

## 12.7. A napenergia fotovillamos hasznosítása

### 12.7.1 Visszatekintés

Archimedes /i.e. 287-212/ görög tudós, bölcselőnek tulajdonítja a technika történelem az első tudatos napenergia hasznosítás tényét.

I.e. 212 –ben, amikor Siracusát a rómaiak hajóhadakkal támadták, Archimedes - egyes források szerint tükörrel, más források szerint a védők pajzsaival – a Nap sugárzásának koncentrálásával lobbantotta lángra a hajókat. Plutarchos és Livius krónikájában a pontos adatok hiányoznak, csak Galens “De Temperamentis”- ében található utalás erre a sajtószerű hadi tetre. Plutarchos azonban arról ad hírt, hogy a vesták Numa Pompilius idejében /i.e. 714-671/ a szent tüzet a Nap sugárzásának segítségével, fémpharakkal koncentráva gyújtották meg. A történetírók szerint az inkák napsugárzás visszaverő felületeket használtak szent ételeik elkészítésénél.

Csak 1800 évvel később Athanasius Kircher /1601-1680/ rekonstruálta Archimedes kísérletét, bár nem hajóhadat gyújtott fel, hanem azt vizsgálta, hogy egy farakást milyen távrolól tud meggyújtani a napsugárzás koncentrálásával. Ezt, a krónika feljegyzése szerint számos tükör és lencsekísérlet követett. A firenzei Averani és Targioni 1694-ben gyémánton, a német matematikus Ehrenfried Walter von Tschirnhaus /1651-1708/ kerámián, Leibharzt Homberg 1699-ben aranyon és ezüstön, majd néhány évvel később Geoffrey vason, cinken, rézen, higanyon végzett sikeres kísérletet napenergia segítségével. Georges Leclerc Buffon /1707-1788/ francia természettudós 1747-ben egy 360 síktükörből álló berendezést épített. Egy kisebb, - 168 db 15x15 cm-es síktükörből álló - berendezéssel Buffon a Királyi Kertben 60 m-ről meggyújtott egy farakást. Ugyanezzel a berendezéssel 39 m-ről ólmot és 18 m-ről ezüstöt olvasztott meg. A kísérletek alapján arra következtetett, hogy Archimedes az ellenséges hajókat 30-42 m távolságról gyújthatta fel. Buffont erre a kísérletsorozatra az készítette, hogy kortársa Descartes, Archimedes tettét legendának tartotta.

Claude Servais Pouillet /1791-1868/ francia fizikus mérte először a Földünkre érkező napsugárzást. Nicholas de Saussure /1740-1799/ svájci tudós 1770-ben készítette az első hőgyújtó dobozt, a termikus kollektor elődjét. Laurent Lavoisier /1743-1794/ francia tudós egyik korai munkájában a napenergia segítségével vizsgálta a levegő összetételét és az oxigént. Lencséből álló, napsugárzás irányába állítható berendezésével 1773 °C-on sikerült platinát megolvasztania. Lavoisier volt az, aki először hívta fel a figyelmet arra, hogy a hagyományos tüzelőanyagok egyszer elfogynak a Földön. A tiszta energiaforrásra, a napenergiára, Lavoisier hívta fel először a figyelmet.

Sir Henry Bessemer /1813-1898/, az ismert angol acélgyártó 1868-ban egy 100 szegmensből álló 3 méter átmérőjű tükörrel napkohót készített. Réz és horgany olvasztására használták. Augustin Mouchot /1825-1911/ francia fizikatanár az 1878-as párizsi világkiállításra olyan nyomdagépet készített, amit napenergiás gőzgép

működtetett. Carlos Wilson 1972-74-ben Észak Chilében Las Salinasban 5000 m<sup>2</sup> –en napi 22 500 l teljesítményű vízdesztilláló berendezést épített. H.E.Willsie és John Boyle 1902-1908 között Kaliforniában négy napenergiával működő motort épített. F.Shuman és C.V.Boys 1913-ban Kairó közelében 35 kW-nál nagyobb teljesítményű napenergiás gőzmotort készített vízszivattyúzásra. Ebben az időben végezték az első energiatárolási kísérleteket is. J.Harrington Új Mexikóban napenergiás gőzmotort készített, amellyel 6 m magasságra, egy 20 m<sup>3</sup> –es tartályba pumpálta a vizet. Ezzel a vízzel egy bányavilágításra szolgáló villamos generátort meghajtó vízturbinát működtetett. C.G. Abott motor és hőtároló kísérleteinek említésén kívül, az elkövetkező 30 év alatt a napenergiás berendezések vesztek versenyképességükből az olcsó tüzelőanyagok miatt. Kivételt képeztek a napenergiás melegvízellátó berendezések, amelyekből számos fajta készült és terjedt el a szoláris övezet, a Ráktérítő és Baktérítő között elhelyezkedő fejlettebb országokban. A második világháborút követően egy felkészülésnek nevezhető időszak következett. Számos nemzetközi szimpóziumot, konferenciát rendeztek a napenergia hasznosítás témakörében. Az 1972-es olajválság hozott fordulatot, amikor a világ figyelme ismét a napenergia hasznosítása felé fordult.

A napelemek vagy fotovillamos elemek, a Nap sugárzási energiáját közvetlenül alakítják át villamos energiává. A fotovillamos energiaátalakítás története jóval rövidebb időszakot jelent. E.Becquerel-t kell elsőként említeni, aki 1839-ben fedezte fel a fotovillamos effektust. Willoughby Smith 1873-ban kimutatta szelénen a fény hatására bekövetkező ellenállás változást. Három évvel később Adams és Day ugyancsak szelénen fotofeszültséget mért. További hét évnél kellett eltelni, hogy Fritts az első működő fotovillamos cellát elkészítse, amely azonban energiaátalakítási szempontból még szóba sem jöhetett. Csak 1941-ben sikerült 1% energiaátalakítási hatásfokú elemet készíteni.

A szilícium alapanyag megjelenése, a félvezető eszközök térhódítása új irányt adott a fotovillamos eszközök fejlődésének. Az első fotovillamos energiaátalakítónak, napelemnek nevezhető eszköz elkészítése 1953-ban a Bell Laboratórium kutatói Pearson, Fuller és Chapin nevéhez fűződik. A kezdetben 6% hatásfokú szilícium napelemek technológiai fejlődése 1958-ra már 14%-os hatásfokú elemek laboratóriumi előállítását tették lehetővé. A földi alkalmazás elterjedése azonban ekkor az igen magas előállítási költségek miatt nem jöhetett szóba.

1958-ban a Vanguard I. műhold 5 mW-os rádióadójának energiaellátására alkalmaztak földön kívül először napelemeket. Ezt számos szovjet és amerikai műhold követte, amelynek fedélzeti villamosenergia ellátását napelemek biztosították. Az űrtechnikában egyeduralgó lett a napelemes villamosenergia ellátás. A földi alkalmazás elterjedésének az 1972-es olajválság adott jelentős lökést. Az ezt követő időszakban néhány év alatt a kutatási ráfordítások összege a világon mintegy 100 sorosára emelkedett. A technológiai fejlesztésre költött dollármilliárdok meghozták az eredményt. Az előállítási költségek rohamosan csökkenni kezdtek, és a napelemek alkalmazási köre szélesedett.

A fejlődés azóta töretlen. Különböző alapanyagokból és felépítéssel, különböző technológiákkal napjainkban több mint 1500 MWp napelemet állítanak elő évente a világon és az eddig legyártott napelemekből készült berendezések összteljesítménye elérte az 4000 MWp-t (MWp: Megawatt peak, névleges csúcs-teljesítmény). A műholdakon és űrhajókon történő alkalmazás után a napelemek földi alkalmazása nagy mértékben terjed. Autonóm áramforrásokon kívül, egyre több kW és MW nagyságrendű napelemes villamosenergia-termelő rendszer épül és bizonyosra vehető, hogy az elkövetkező időszak energiaellátásában a napenergia egyre növekvő mértékben részesül. Nemzeti

és nemzetközi programok jelölik ki a fejlesztés és alkalmazás irányát és adnak keretet, helyet és támogatást a napenergia hasznosításának.

A napenergia hasznosítás és ezen belül a fotovillamos hasznosítás hazai mérföldkövei tömondatokban az alábbiakban foglalhatók össze.

1975. A Villamosipari Kutató Intézetben (VKI) az első szilícium napelemek elkészültek.

Napelemes áramforrás készült Iszkahegyen saját fejlesztésű napelemekből.

1977. Vékonyréteg találmány (a szerző és társai VKI).

1978. Napelemes fényérzékelő találmány (a szerző és társai VKI).

1979. 15% hatásfokú szilícium napelem kifejlesztése, találmány (a szerző és társai VKI).

1982. A Magyar Elektrotechnikai Egyesületben megalakult a napelem munkabizottság.

1983. Megalakult a Magyar Napenergia Társaság.

1984. Napelem modul találmány (a szerző és társai VKI).

1987. Napelemes akkumulátor találmány (a szerző és társai VKI).

1989. Megalakult a Pannonglas SOLARLAB.

1990. Megalakult a Solart-System Kft.

1993. ISES Napenergia Világkonferencia és Kiállítás Budapesten

1997. Megalakult a Dunasolar Rt.

2004. A SANYO napelem modulgyárat alapított Dorogon.

Ma már több tucat forgalmazó és szervezet foglalkozik napelemek forgalmazásával, alkalmazásával Magyarországon.



12.7.1/1. ábra Iszkahegyi napelemes állomás (1975)

## 12.7.2. A Nap sugárzásának-fotovillamos energiaátalakítás szempontjából fontos - jellemzői

A Napban végbemenő termonukleáris reakció hatására energia szabadul fel, amely a Nap felületéről sugárzás formájában távozik a világűrbe. Az évente lesugárzott energia értéke  $1,2 \cdot 10^{34}$  J, amely kb.  $\pm 1\%$  -on belül állandó. Földünkre ebből a hatalmas energiából  $2 \cdot 10^{24}$  J jut évente, amely több mint tízezerszerese a Föld teljes energiaigényének. A Föld pályájának excentricitása miatt ez az energia éves viszonylatban kb.  $\pm 3\%$  -kal változik. Átlagos Föld-Nap távolság mellett a Föld légkörén kívül a sugárzásra merőleges felületen időegység alatt átáramló sugárzási energia átlagértéke  $1353 \text{ W/m}^2$ , amelyet nap-állandónak (solar constant) is szokás nevezni. Ez az érték a leggyakrabban használt más mértékegységekben a következő:  $1940 \text{ Langley/perc}$ ,  $1940 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{perc}$ , ill az angolszász irodalomban gyakran használt mértékegységben kifejezve  $428 \text{ BTU/ft}^2 \cdot \text{h}$ . A földközi pályán működő fotovillamos berendezések tervezésénél ezek az értékek irányadóak. A Föld felszínére érkező sugárzást azonban számos egyéb tényező - mint például a földrajzi helyzet, atmoszférikus viszonyok, napszak stb. befolyásolja.

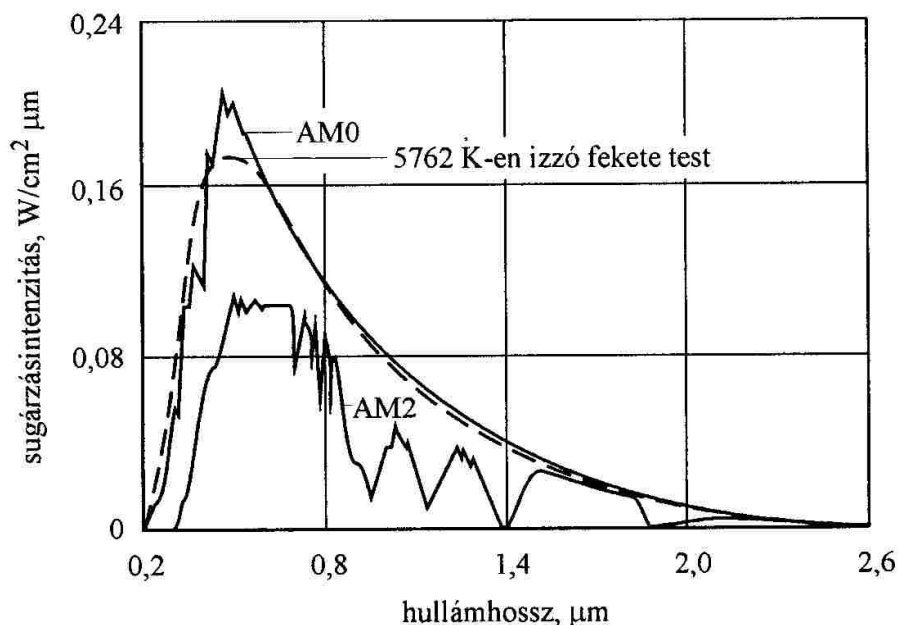
A Nap sugárzásának spektrális eloszlását közelíthetjük egy  $5762 \text{ }^\circ\text{K}$  -en izzó fekete test sugárzási spektrumával. A pontos sugárzási spektrum a 70-es években, a Földön kívüli mérések eredményeinek kiértékelése alapján született meg. A Nap sugárzásának energiahordozói a fotonok. A fotonok közül egyes meghatározott hullámhosszúak a Földet körülvevő légrétegen áthaladva a gázatomokon-gázmolekulákon abszorbeálódnak.  $0,38 \mu$  hullámhossz alatt (ibolyántúli tartomány) a felső légrétegek ózontartalma, valamint az oxigén és nitrogén okoz jelentős abszorpciót. Ebből adódóan Földünk felszínén a  $0,3 \mu$  -nál rövidebb hullámhosszú sugárzás intenzitása általában igen alacsony. A spektrum látható tartományában -  $0,38 \mu$  -  $0,74 \mu$  hullámhossz között - az abszorpció csak kisebb mértékű.  $0,74 \mu$  hullámhossz fölött (infravörös tartomány) az abszorpciót a légkörben lévő többatomos molekulák, a víz és a széndioxid okozzák.

A légkör hatását a Földünket érő sugárzás spektrumára és intenzitására megkísérelték leegyszerűsített módon figyelembe venni. Ebből a célból vezették be az optikai légréteg fogalmát (Air Mass, AM). A Föld légkörén kívül az optikai légréteg 0, és a sugárzást AM0 -val jelöljük. A Föld felszínére a tengerszint magasságában merőlegesen tiszta időben beérkező sugárzást AM1-el jelöljük. Az optikai légréteg a Földön lévő tengerszint magasságában fekvő megfigyelési pontban tiszta időben

$$AM = \frac{1}{\cos \alpha} \quad (12.7.2./1)$$

ahol  $\alpha$  a megfigyelési pontban a beérkező sugárzás és a függőleges által bezárt szög. (pl.  $\alpha = 60^\circ$  esetén AM2 úgy is tekinthető, hogy a beeső sugárzásnak a légréteg vastagságának kétszeresén kell áthaladnia!) Valójában ez túlzott leegyszerűsítése a légréteg hatásának a sugárzás intenzitására és spektrumára, mert az a tengerszint feletti magasságtól, hőmérséklettől, páratartalomtól, szennyezés mértékétől stb. igen jelentős mértékben változik. Azonban a gyakorlatban ez az egyszerűsítés megfelelő és a napelemek vizsgálatánál, minősítésénél - egy a Nap sugárzásának megfelelő és az alkalmazásnál gyakran előforduló pl. AM1,5 - rögzített spektrumot állítanak be mesterséges fényforrással.

A 12.7.2/1 ábrán a Nap sugárzásának AM0, AM2, valamint az 5762 °K-en izzó ideális fekete test sugárzásának spektrális eloszlását láthatjuk.



12.7.2/1 ábra A Nap és az 5762 °K-en izzó fekete test sugárzásának spektrális eloszlása

Egy bizonyos  $\lambda_1$  és  $\lambda_2$  hullámhosszal határolt spektrumra vonatkozó felületegységen időegység alatt átáramló  $E_{\lambda_1-\lambda_2}$  energiát az  $E(\lambda)$  spektrális eloszlás függvény integrálásával határozhatjuk meg.

$$E_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \cdot d\lambda \quad (12.7.2./2)$$

A fotonok energiája és a hullámhossz között az

$$E_F = \frac{hc}{\lambda} \quad (12.7.2./3)$$

összefüggés teremt kapcsolatot, ahol  $h$  a Planck-féle állandó ( $4,13 \cdot 10^{-15}$  eVs;  $6,62 \cdot 10^{-34}$  Js) és  $c$  a fény sebessége ( $3 \cdot 10^8$  m/s).

A  $\phi$  foton fluxus, vagyis a sugárzásra merőleges egységnyi felületen másodpercenként áthaladó fotonok száma úgy határozható meg, hogy a spektrum teljes egészére különböző  $\lambda$  hullámhosszakon meghatározzuk  $\phi(\lambda)$  értékét, és ezt összegezzük. Vagyis

$$\phi = \sum_{\lambda=0}^{\infty} \phi(\lambda) \quad (12.7.2./4)$$

Különböző  $\lambda$  hullámhosszaknál  $\Delta\lambda$  tartományban az 12.7.2./2 egyenlet segítségével az  $E_\lambda$ -t, az 12.7.2./3 egyenlet segítségével az  $E_F(\lambda)$ -t határozhatjuk meg, és a kettő hányadosa adja a  $\phi(\lambda)$  fluxust. Így az 12.7.2./4 egyenlet a következőképpen alakul:

$$\phi = \sum_{\lambda=0}^{\infty} \phi(\lambda) = \sum_{\lambda=0}^{\infty} \frac{E_\lambda}{E_F(\lambda)} \quad (12.7.2./5)$$

A fotonok átlagos energiáját  $E_{av}$ -t is kiszámíthatjuk, ha az 12.7.2./2 egyenletet  $\lambda = 0 \rightarrow \infty$

között integráljuk, vagyis  $E = \int_0^{\infty} E(\lambda) \cdot d\lambda$  és elosztjuk a  $\phi$  fluxussal és így

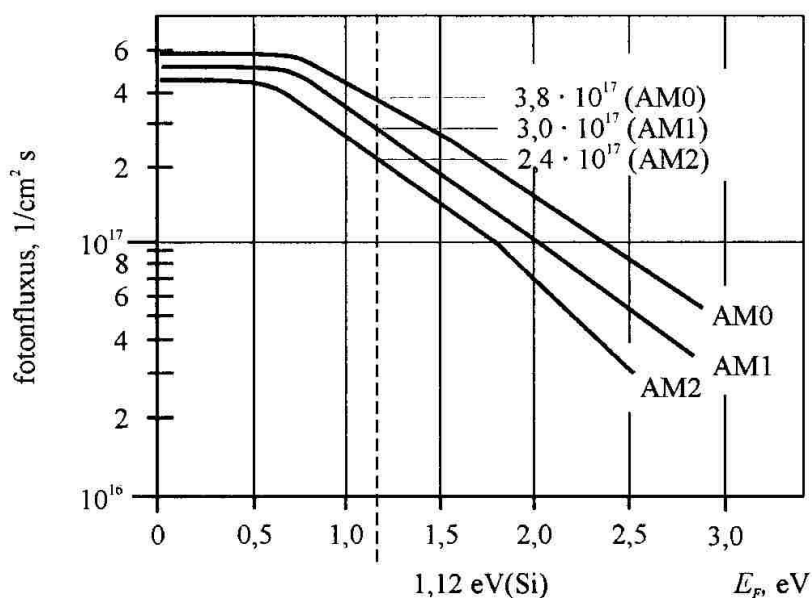
$$E_{av} = \frac{E}{\phi} \quad (12.7.2./6)$$

Az 12.7.2./1 táblázatban összefoglaltuk különböző optikai légrétegekre  $E$ ,  $E_{av}$  és  $\phi$  értékeit.

12.7.2./1 Táblázat

	$E$ [mW/cm <sup>2</sup> ]	$E_{av}$ [eV]	$\phi$ [1/cm <sup>2</sup> s]
AM0	<b>135</b>	<b>1,48</b>	<b><math>5,8 \cdot 10^{17}</math></b>
AM1	<b>106</b>	<b>1,32</b>	<b><math>5 \cdot 10^{17}</math></b>
AM2	<b>88</b>	<b>1,28</b>	<b><math>4,3 \cdot 10^{17}</math></b>

A fotovillamos energiaátalakítás szempontjából lényeges az  $E_F$  -nél nagyobb energiájú -a napelem félvezető alapanyagának tiltottsáv-szélességénél nagyobb energiájú, azaz hatékony -  $\phi_g$  fotonfluxus ismerete. Az ismertetett gondolatmenet alapján az  $E_F$  -nél nagyobb energiájú  $\phi_g$  fotonfluxus különböző optikai légrétegekre kiszámítható, amelyet az 12.7.2./2 ábrán láthatunk.



12.7.2./2  $E_F$ -nél nagyobb energiájú fotonfluxus különböző optikai légrétegeknél

## 12.7.2. A Nap sugárzásának helyi eloszlása

A napelemek által termelhető villamos energia az alkalmazás, üzemelés helyén lévő sugárzás függvénye. Földünk felszínére érkező sugárzás energiáját és spektrumának eloszlását a légköri tényezők (felhőzet, páratartalom, szennyezettség stb.), a földrajzi helyzet, a napszak, az évszak befolyásolják. A különböző AM optikai légrétegek definiálásával igyekeztünk a sugárzás jellemzőit meghatározni (így pl. az AM1 megvilágítás a valóságban az egyenlítőnél, tengerszinten merőleges napállásnál, tiszta időben mérhető sugárzásnak felel meg).

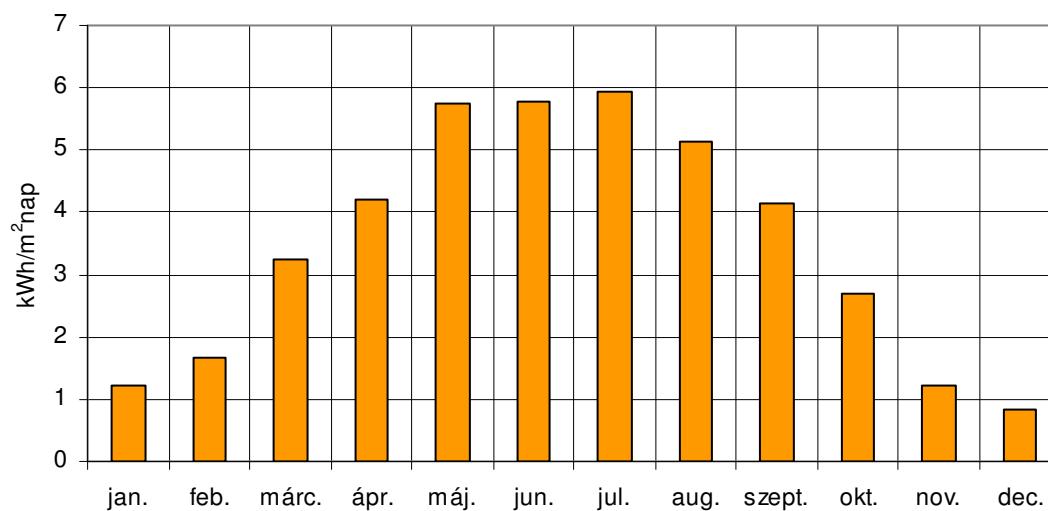
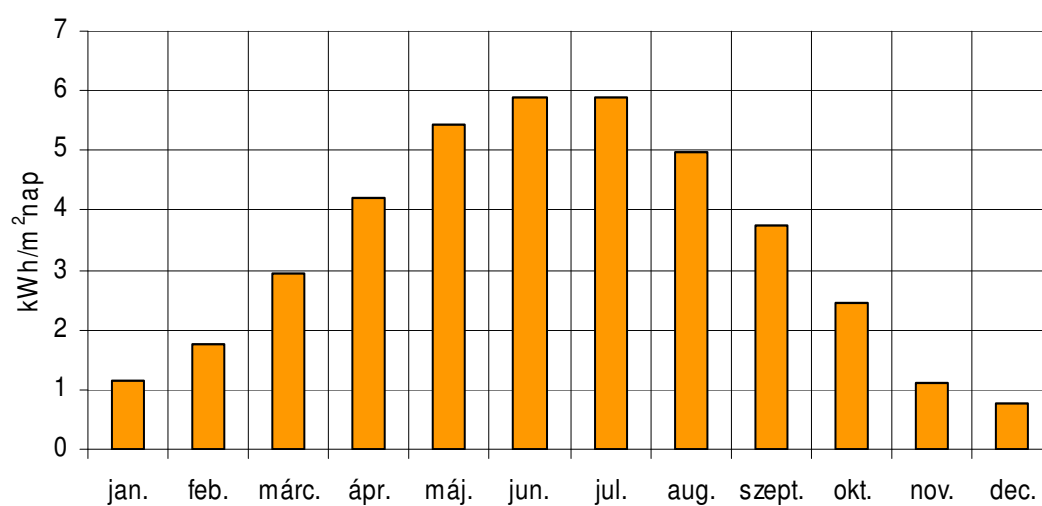
Földünkre a Napból érkező sugárzási energiát globál sugárzásnak nevezzük. Derült időben a globál sugárzás két összetevőre bontható: a direkt sugárzásra, amely közvetlenül jut, a megfigyelt helyre a Napból, valamint a diffúz sugárzásra, amely a levegő alkotórészein történő szóródás után (tiszta időben az égboltról) érkezik a felszínre. Borult időben a globál sugárzást csak a diffúz sugárzás alkotja.

Egy nap folyamán a felületegységre érkező sugárzási energiát a sugárzás intenzitásának integrálásával kapjuk. Az időjárás változásától függően különböző napi fajlagos energiamennyiségek érkeznek, és ezek összege eredményezi az éves viszonylatban beérkező energia mennyiséget. A különböző földrajzi pontokon lévő meteorológiai állomások mérik a vízszintes felületre beérkező napi sugárzási értékeket és általában hónapokra átlagolva adják meg.

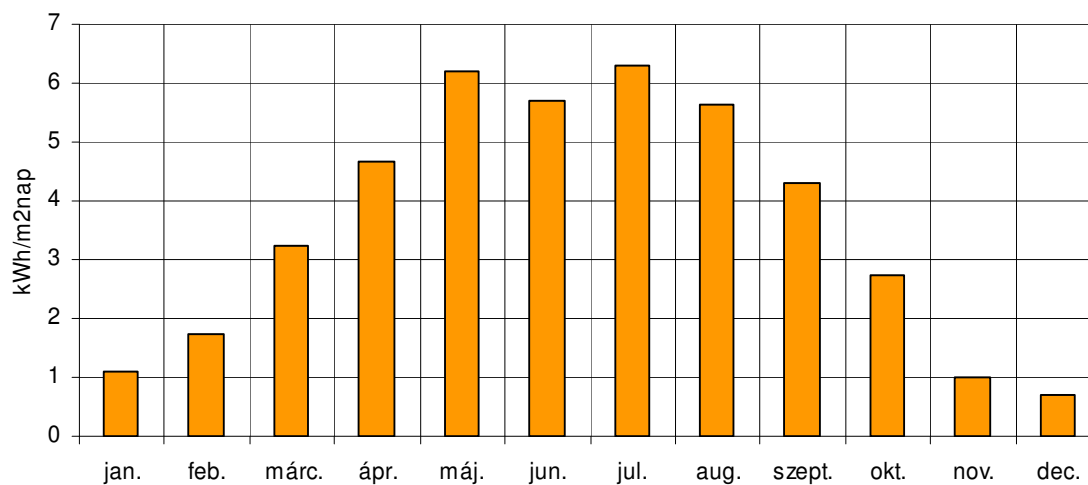
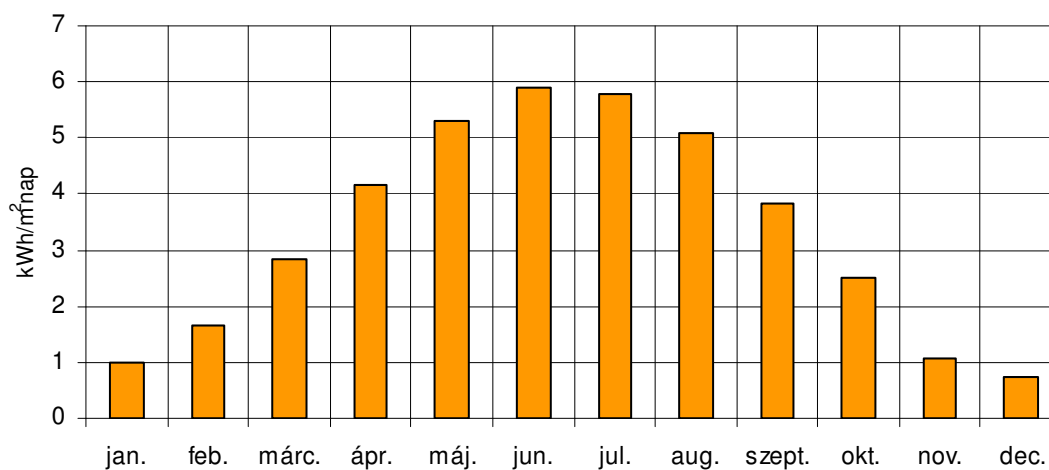
A következőkben ezen adatok felhasználásával ábrázoljuk kWh/m<sup>2</sup>nap -ban hazánk különböző pontjain vízszintes felületen mért teljes vagy globál sugárzás átlagértékeket az év különböző hónapjaiban.

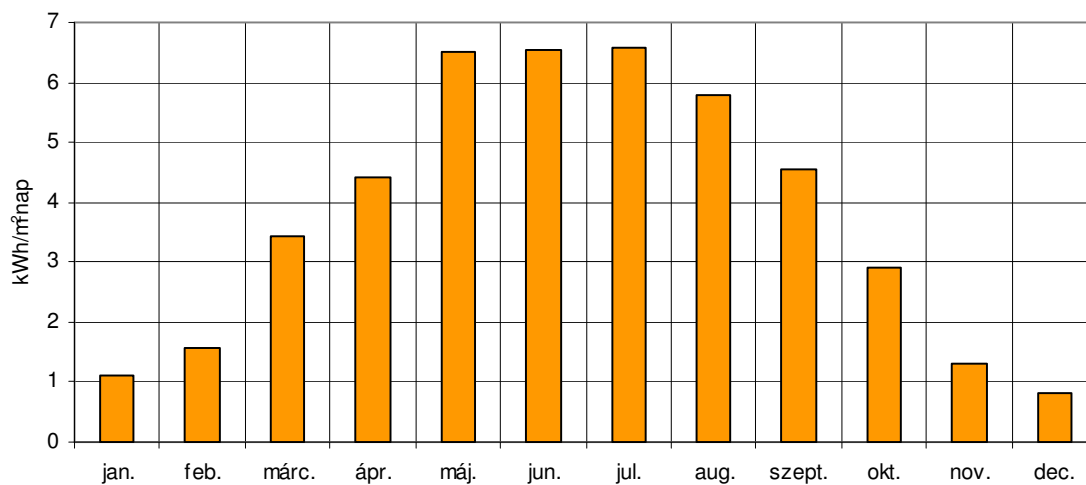
A források az Országos Meteorológiai Szolgálat mérési adatait használják fel ill. átlagolják 1966-ot megelőző időszakra. és 1958-1972 időszakra. A 1.2.7.2/1. - 1.2.7.2/26. ábrákon különböző mérési helyszíneken a globál sugárzás vízszintes felületen mért napi fajlagos átlag értékét ábrázoljuk az év különböző hónapjaira. A 1.2.7.2/27. és a 1.2.7.2/28. ábrán a különböző mérési helyszíneken a globál sugárzás vízszintes felületen mért napi fajlagos értékét egész évre átlagolva ábrázoljuk.

Ezek az adatok jól alkalmazhatók napelemes berendezések, és ezen belül napelemes áramforrások tervezésénél.

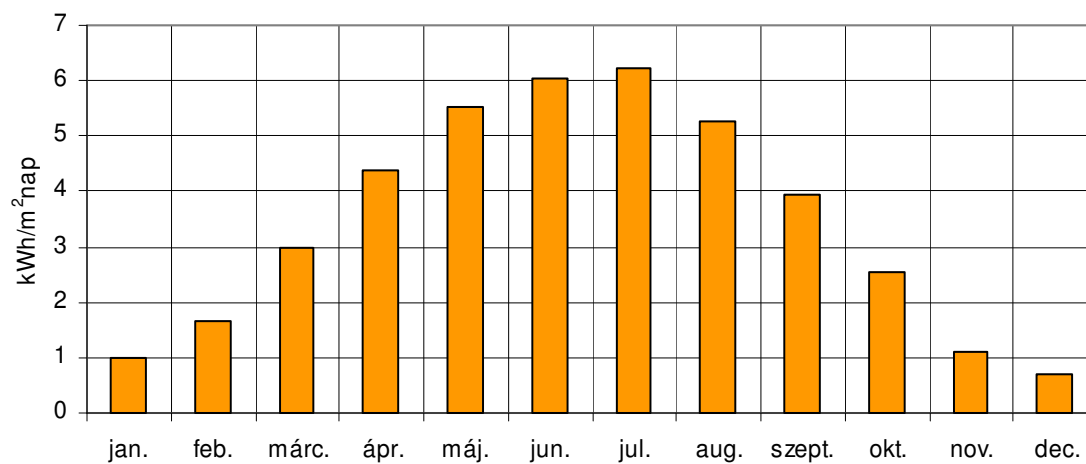
**Békéscsaba (1965-ig)**1.2.7.2/1. ábra. Lőf és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1273 kWh/m<sup>2</sup>év.**Békéscsaba (1958-1972)**1.2.7.2/2. ábra. Major és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1231 kWh/m<sup>2</sup>év.



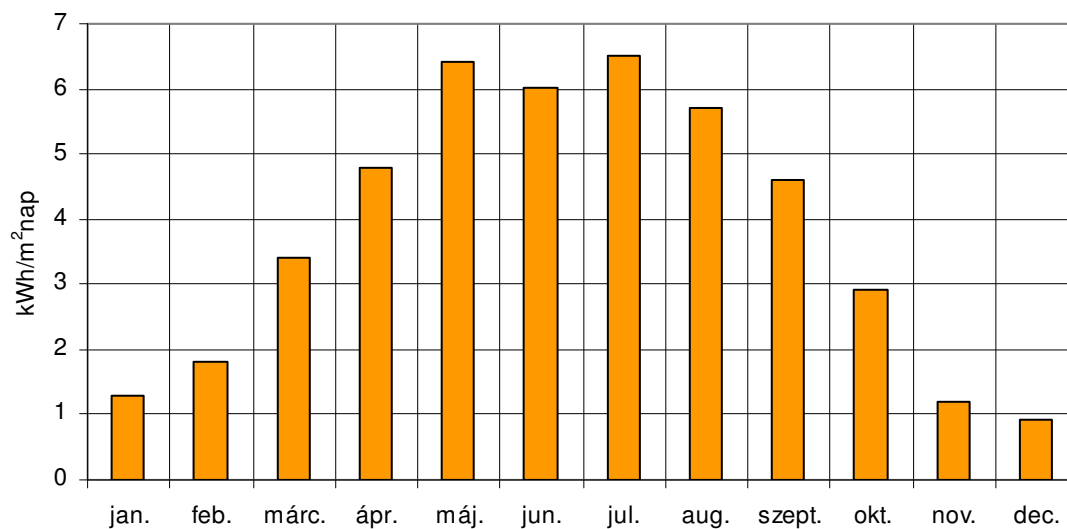
**Budapest (1965-ig)**1.2.7.2/3. ábra Löff és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1316 kWh/m<sup>2</sup>év.**Budapest (1958-1972)**1.2.7.2/4. ábra. Major és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1212 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Debrecen (1965-ig)**

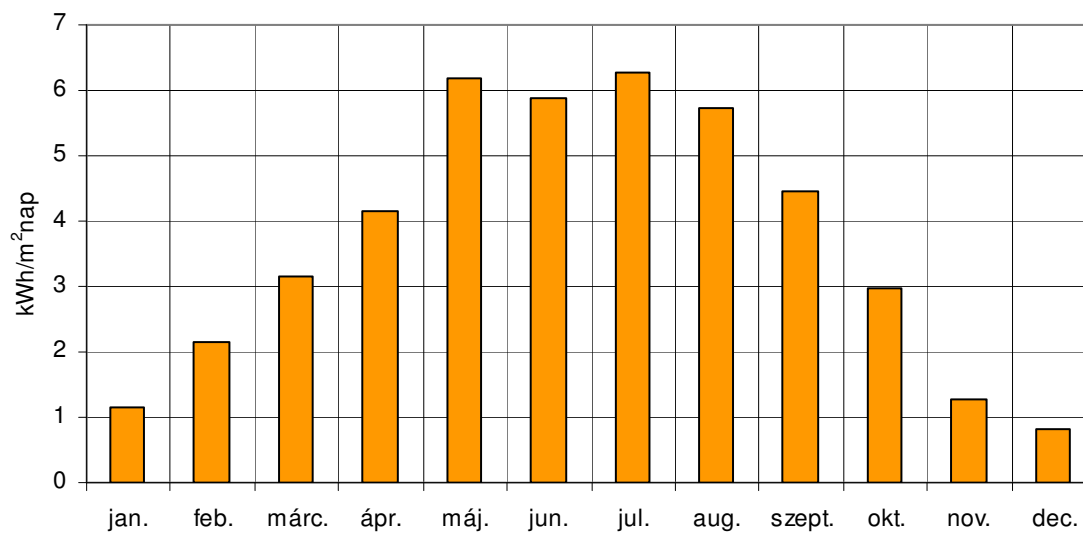
1.2.7.2/5. ábra Löff és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1384 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Debrecen (1958-1972)**

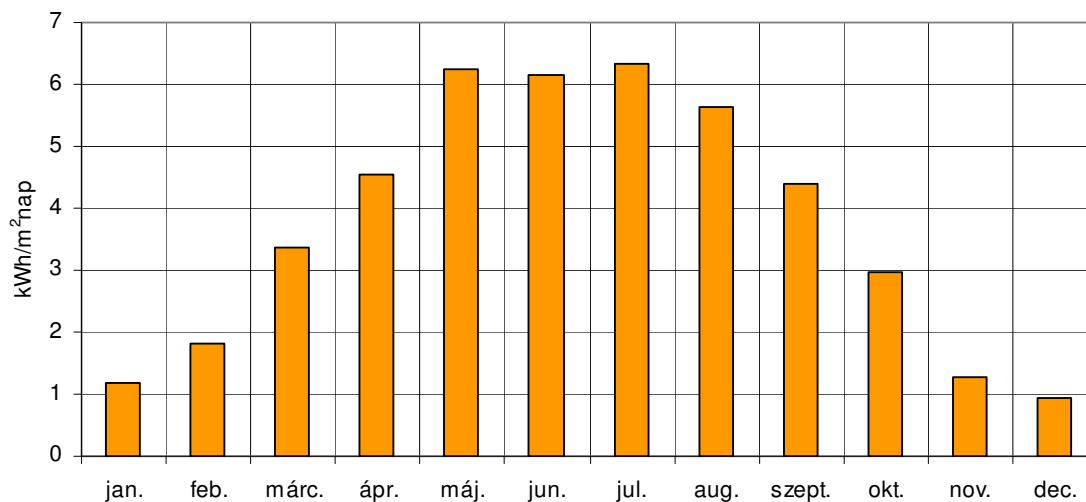
1.2.7.2/6. ábra. Major és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1260 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Kalocsa (1965-ig)**

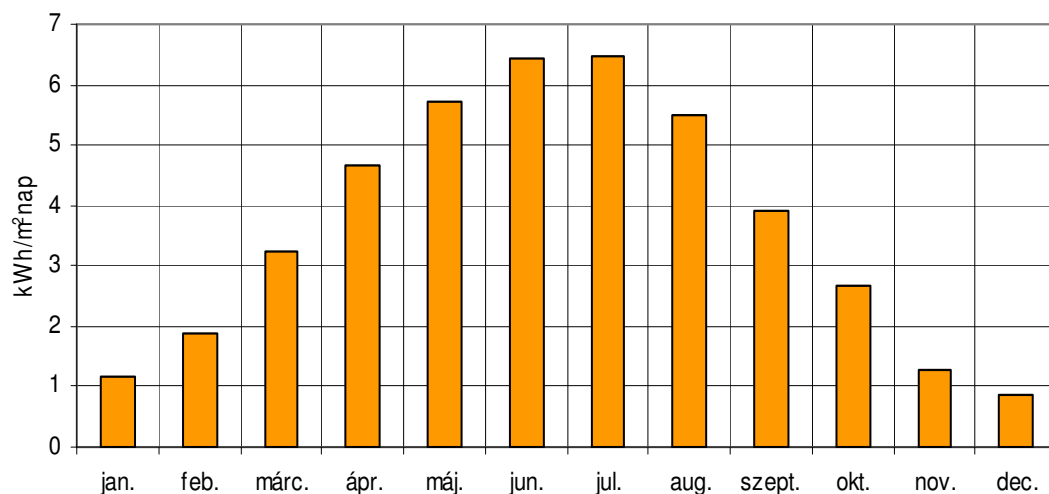
1.2.7.2/7. ábra Löff és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1367 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Kékestető (1965-ig)**

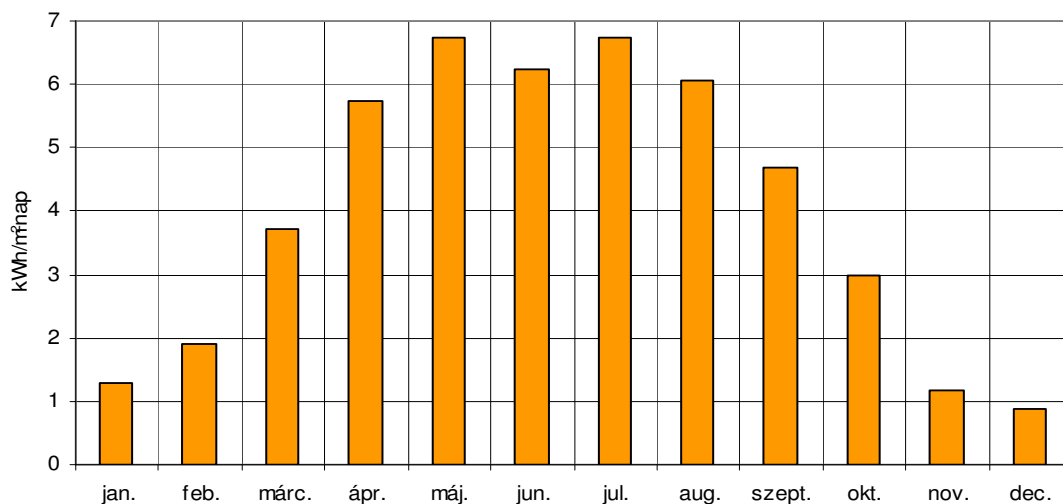
1.2.7.2/8. ábra Löff és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1345 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Kecskemét (1965-ig)**

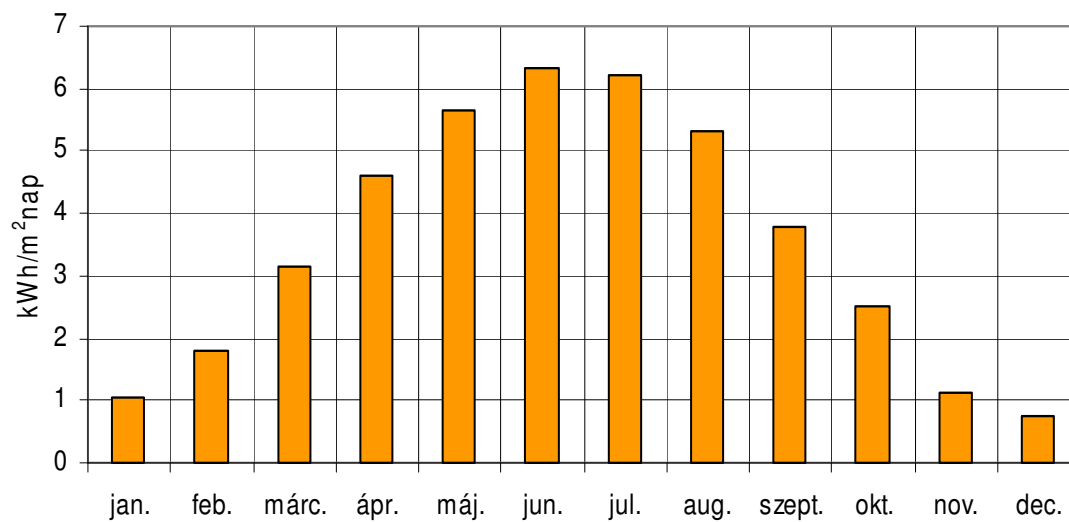
1.2.7.2/9. ábra Löff és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1367 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Kecskemét (1958-1972)**

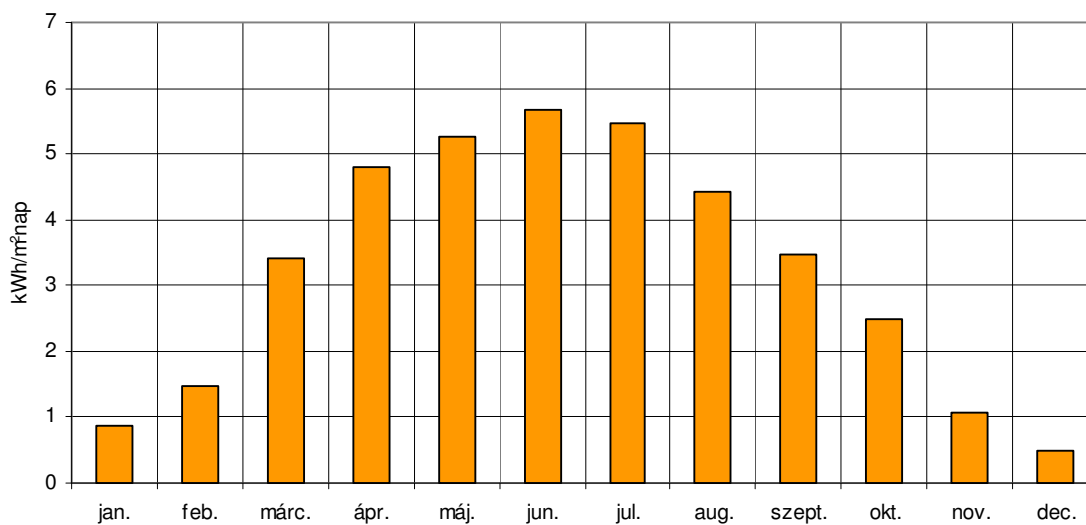
1.2.7.2/10. ábra. Major és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1336 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Keszthely (1965-ig)**

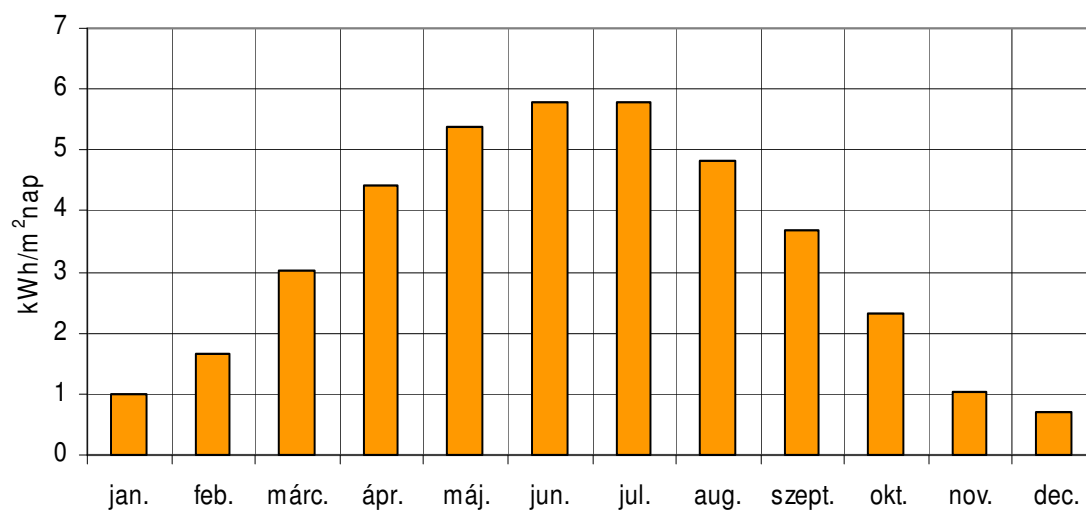
1.2.7.2./11. ábra Lőf és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1464 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Keszthely (1958-1972)**

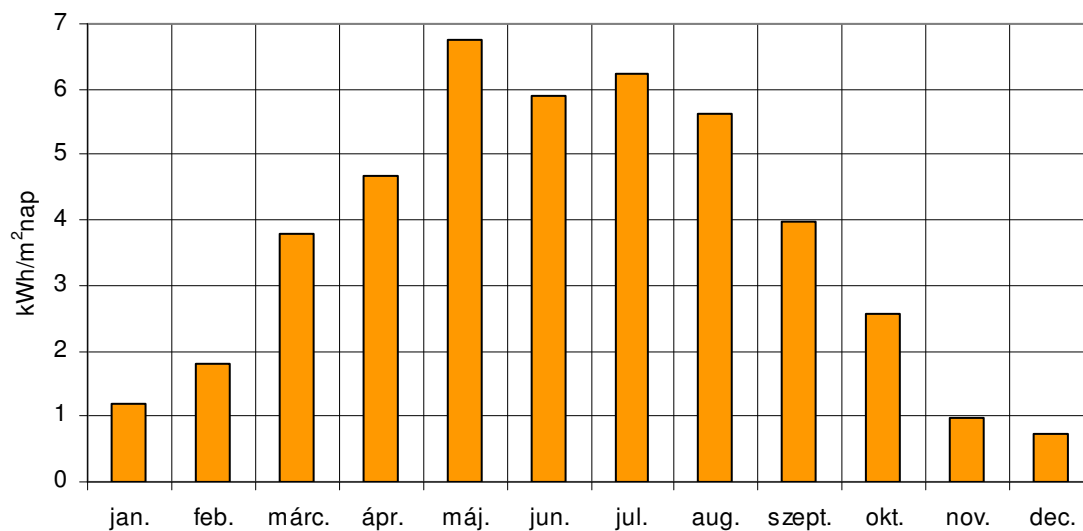
1.2.7.2./12. ábra. Major és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1289 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Kisvárdá (1965-ig)**

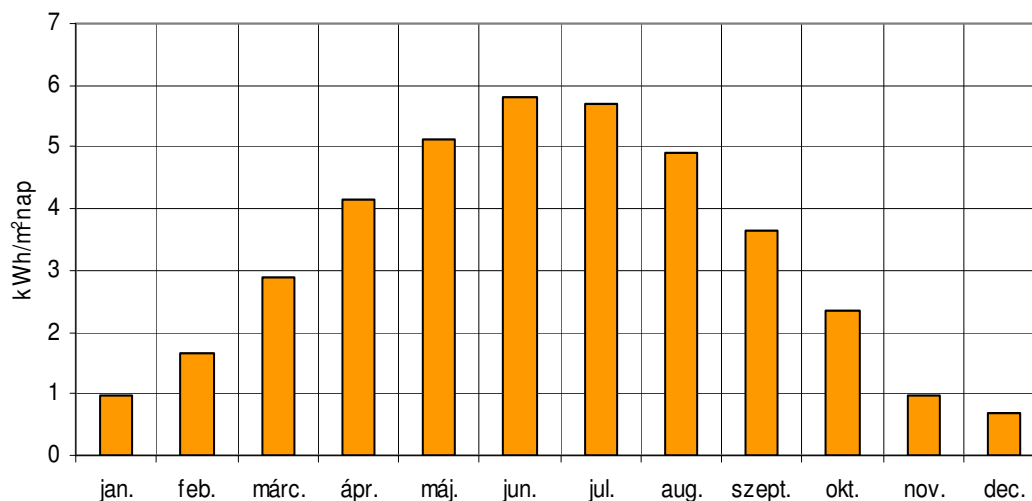
1.2.7.2/13. ábra Lőf és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1184 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Kisvárdá (1958-1972)**

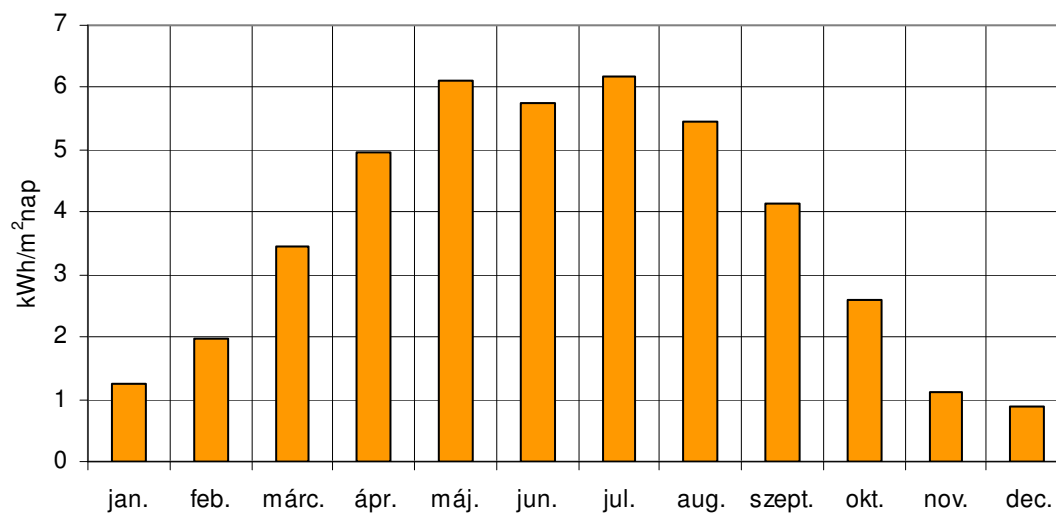
1.2.7.2/14. ábra. Major és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1206 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Martonvásár (1965-ig)**

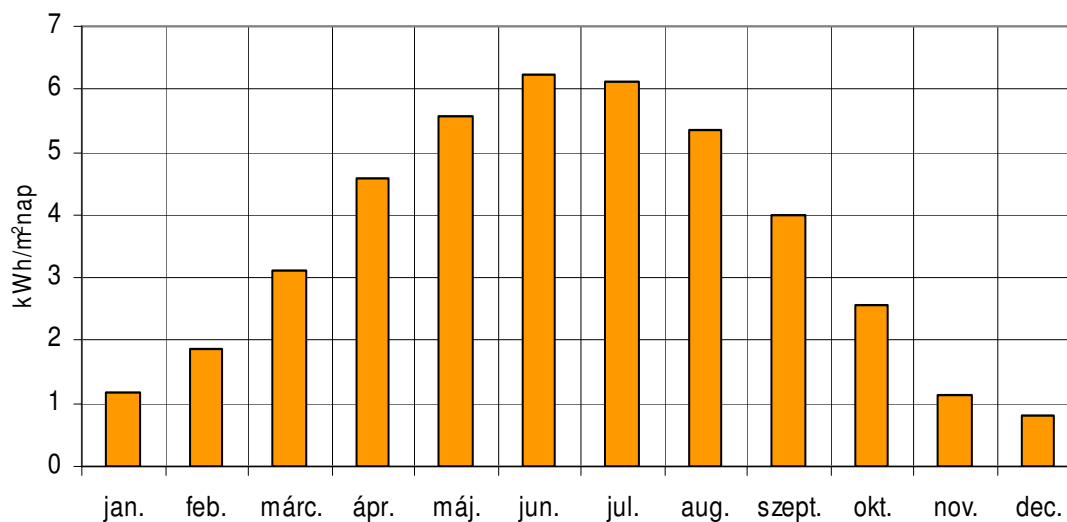
1.2.7.2/15. ábra Lőf és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1345 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Martonvásár (1958-1972)**

1.2.7.2/17. ábra. Major és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1186 kWh/m<sup>2</sup>év.

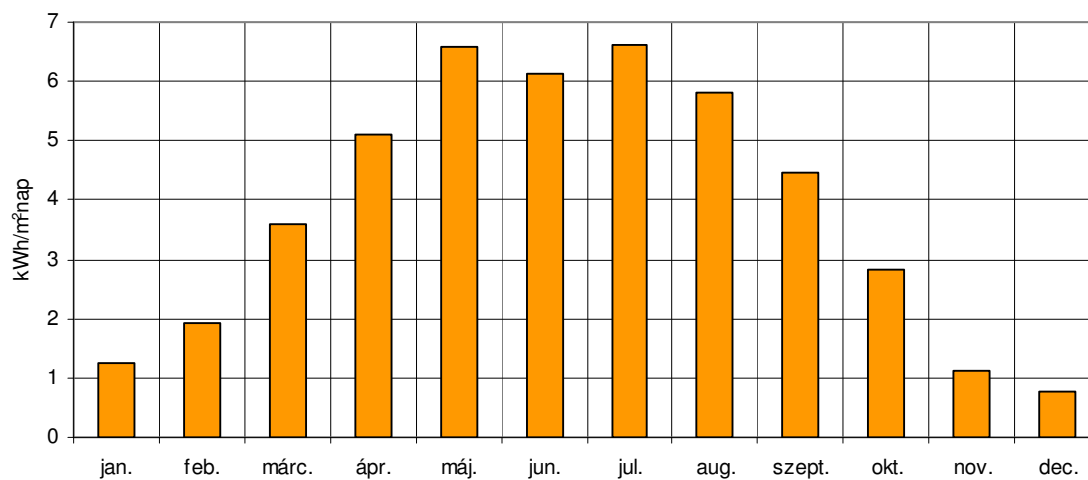
**Pécs (1965-ig)**

1.2.7.2/17. ábra Löff és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1333 kWh/m<sup>2</sup>év.

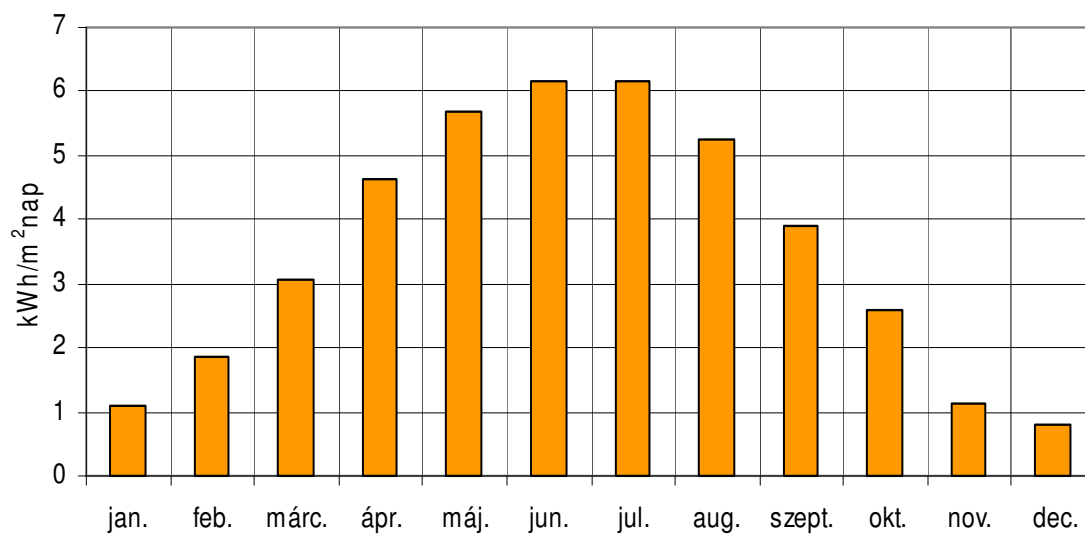
**Pécs (1958-1972)**

1.2.7.2/18. ábra. Major és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1298 kWh/m<sup>2</sup>év.

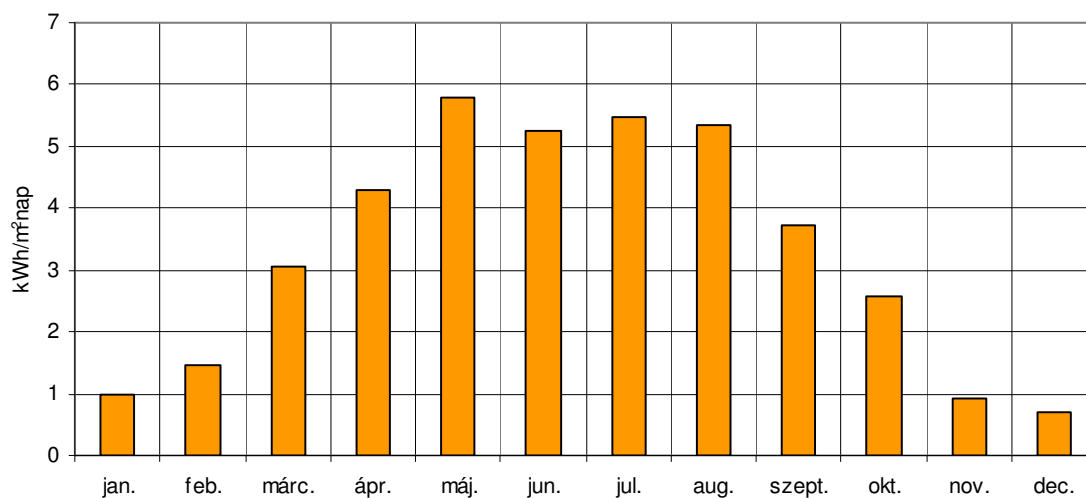


**Siófok (1965-ig)**

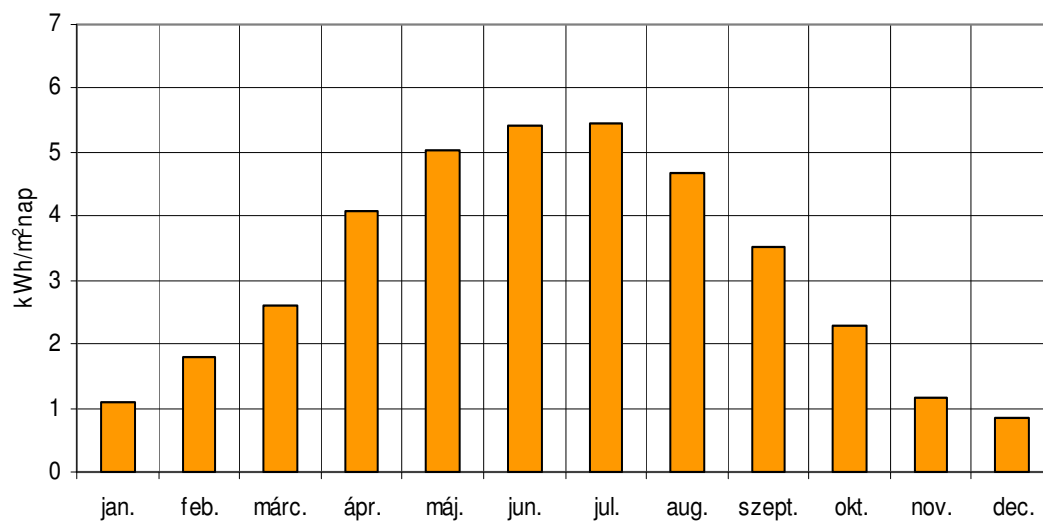
1.2.7.2/19. ábra Löff és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1405 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Siófok (1958-1972)**

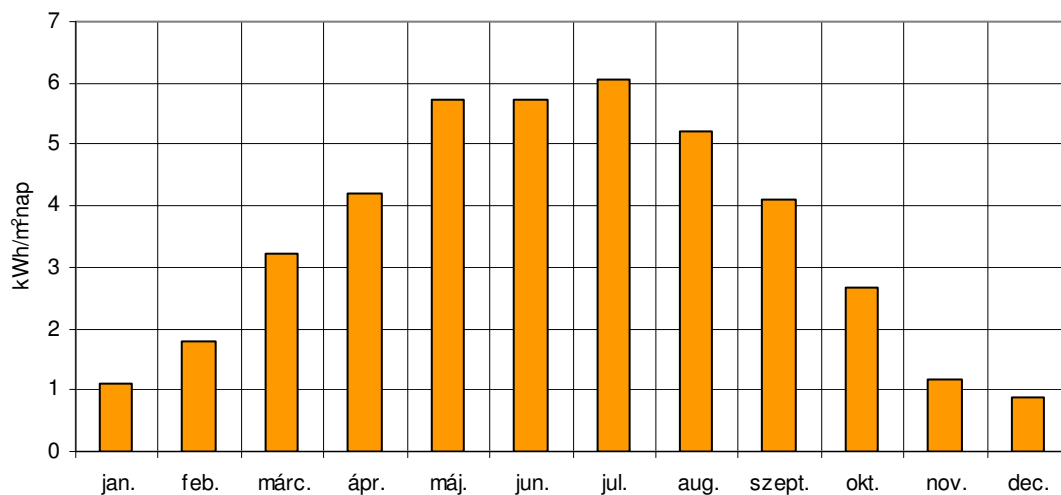
1.2.7.2/20. ábra. Major és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1289 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Sopron (1965-ig)**

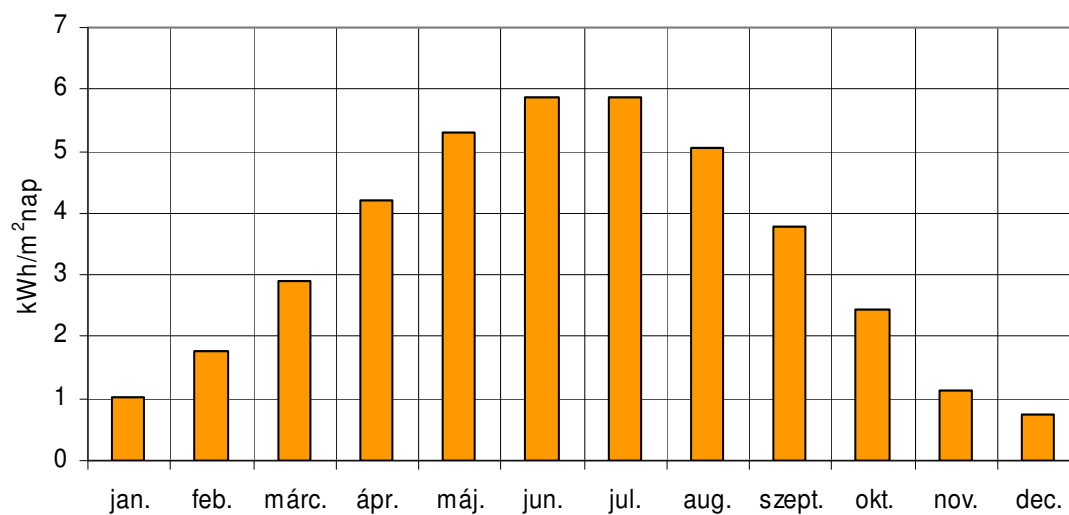
1.2.7.2/21. ábra Löff és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1205 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Sopron (1958-1972)**

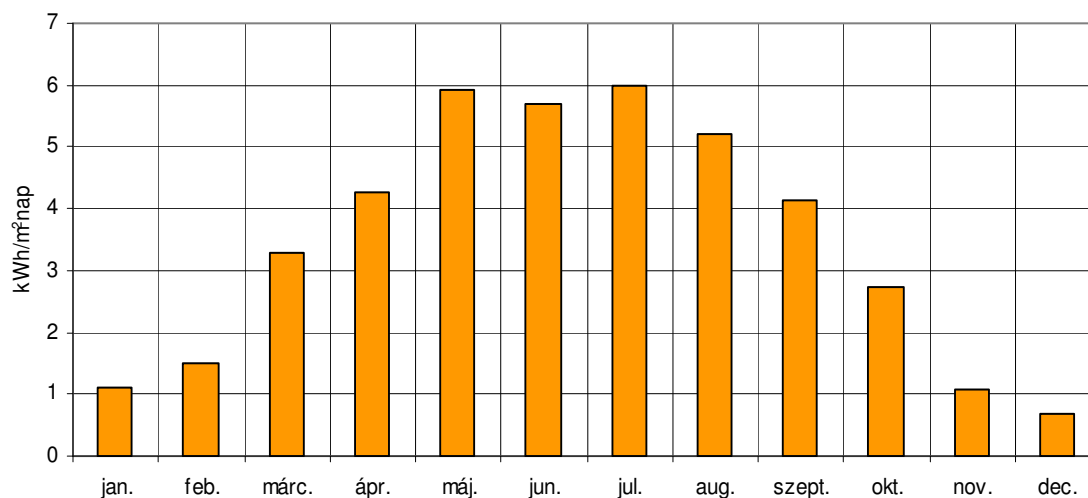
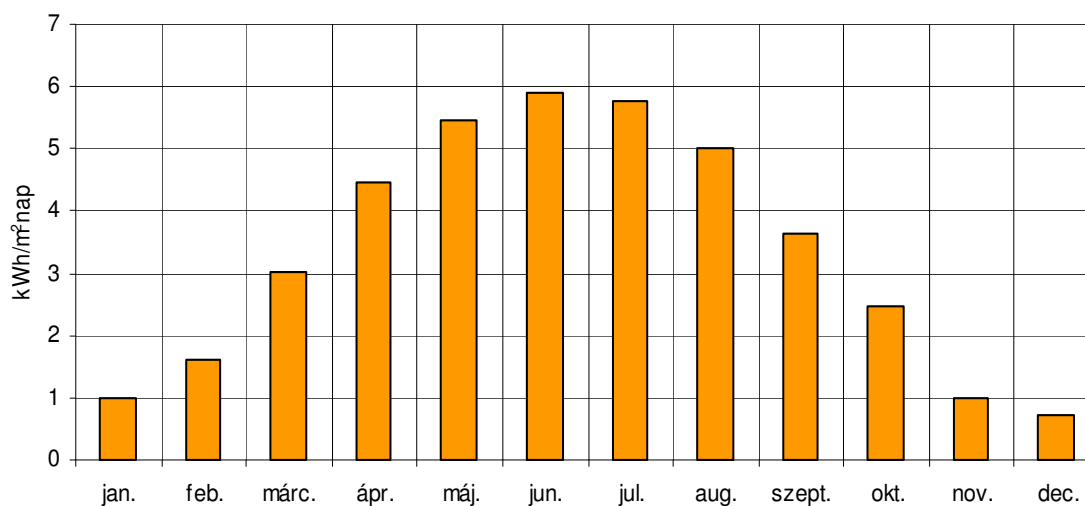
1.2.7.2/22. ábra. Major és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1157 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Szeged (1965-ig)**

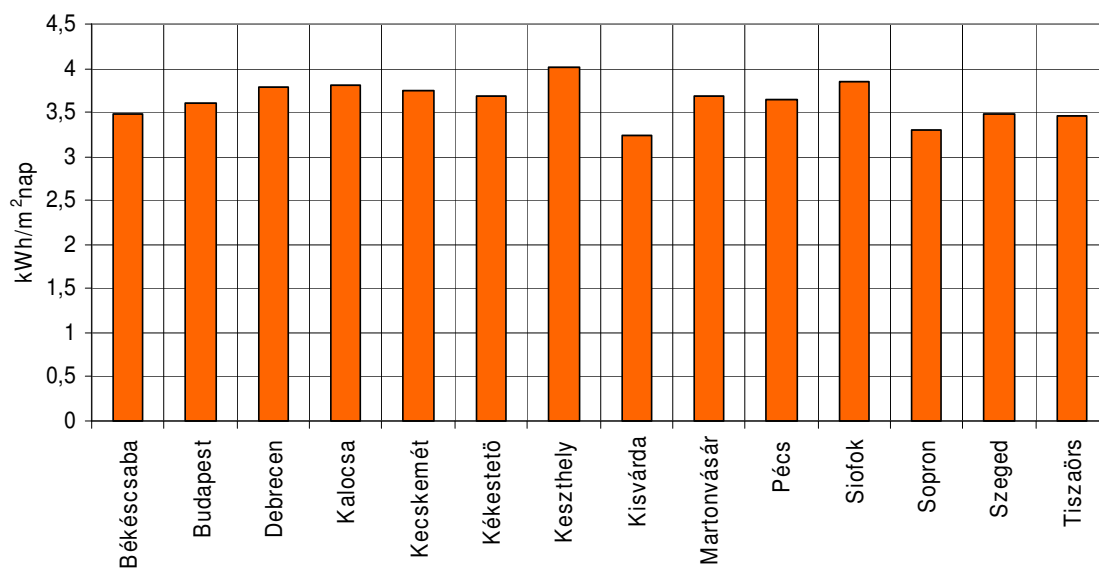
1.2.7.2/23. ábra Löff és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1273 kWh/m<sup>2</sup>év.

**Szeged (1958-1972)**

1.2.7.2/24. ábra. Major és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1223 kWh/m<sup>2</sup>év.

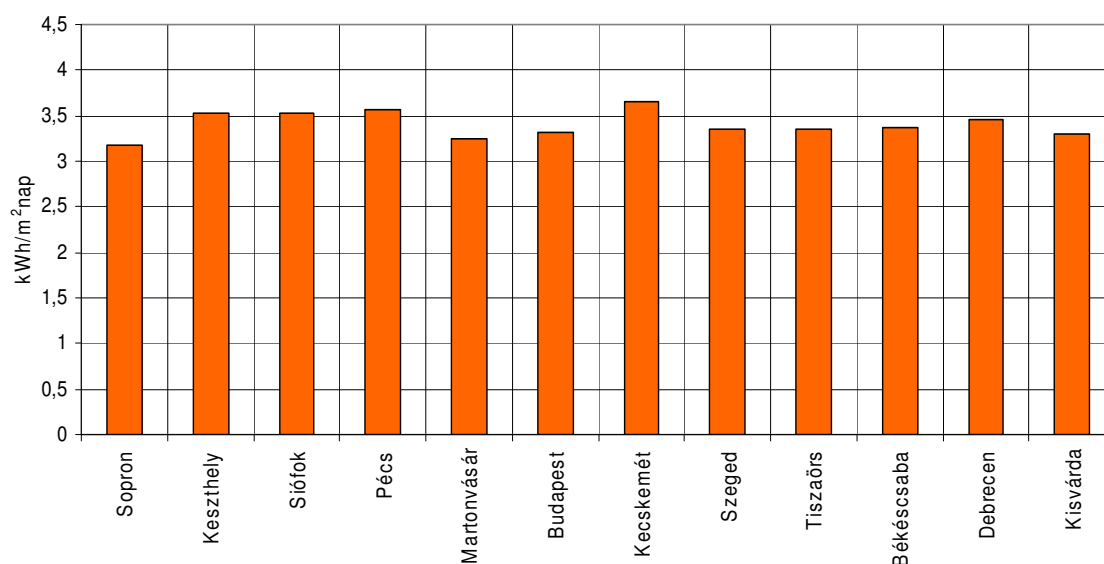
**Tiszaörs (1965-ig)**1.2.7.2/25. ábra Löff és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1265 kWh/m<sup>2</sup>év.**Tiszaörs (1958-1972)**1.2.7.2/26. ábra. Major és társai feldolgozása alapján. Éves átlag: 1222 kWh/m<sup>2</sup>év.

## Éves átlag 1965-ig



1.2.7.2/27. ábra. Lőf és társai feldolgozása alapján.

## Éves átlag 1958-1972 között



1.2.7.2/28. ábra. Major és társai feldolgozása alapján.

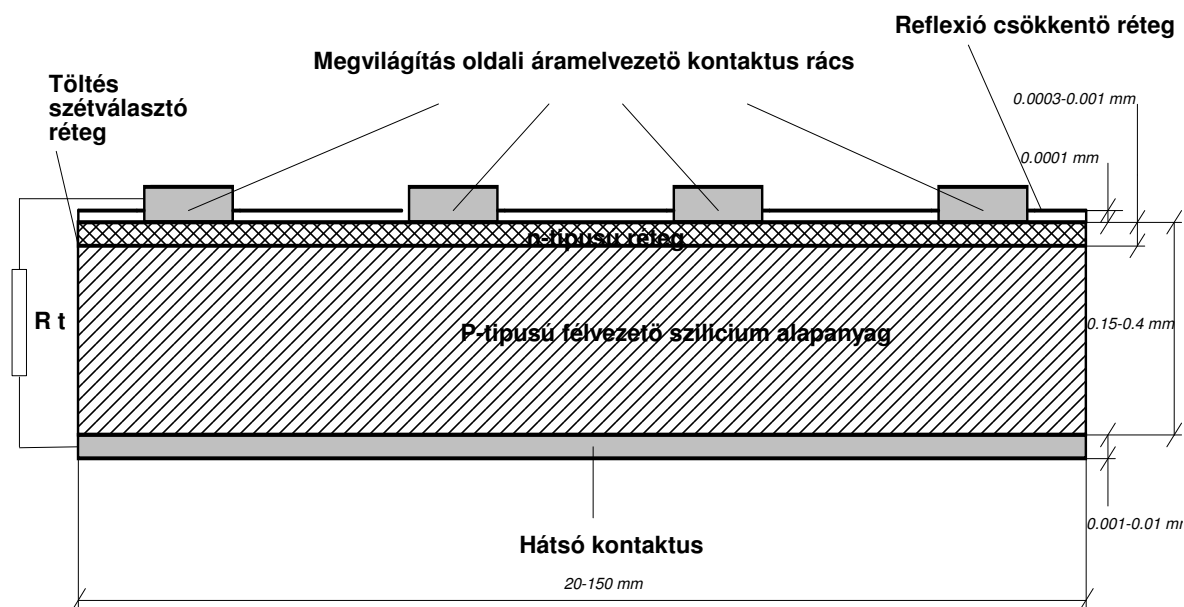
### 12.7.3 A napelemek felépítése és működési jellemzői

A napelem olyan fotovillamos elem, amely a Nap sugárzási energiáját közvetlenül alakítja át villamos energiává. A napelemek alapanyaga félvezető. Az energiaátalakítás a félvezető alapanyagban játszódik le. A félvezető anyagokat érő sugárzás azon része, amelynek  $E_F$  energiája nagyobb mint a félvezető anyag  $E_g$  tiltottsáv szélessége, a félvezető anyagokban villamos töltéshordozó lyuk-elektron párt generálhat, amennyiben az anyagok felületéről nem verődik vissza, illetőleg az abszorpcióhoz elegendő anyagvastagság áll rendelkezésre.

A fotovillamos elem olyan kialakítású, hogy a megfelelő vastagságú félvezető anyagban lyuk-elektron párt szétválasztó réteggel, többnyire félvezető pn átmenettel, valamint az áram elvezetésére szolgáló p-, ill. n- réteghez csatlakozó kontaktussal rendelkezik. A sugárzás felőli, megvilágítás oldali aktív felülete olyan kialakítású, hogy arról a félvezető anyag számára hasznosítható  $E_g$ -nél nagyobb energiájú sugárzás minél kisebb mértékben verődjék vissza.

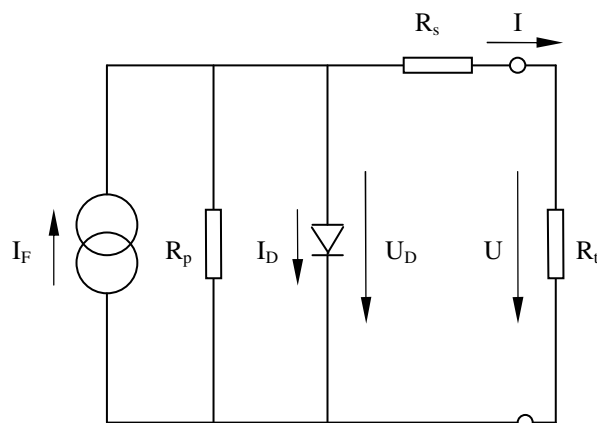
A jelenleg alkalmazott hosszú élettartamu, nagy hatásfokú napelemek többsége egykristályos illetőleg polikristályos szilícium alapanyag felhasználásával készül. Az egykristályos illetőleg polikristályos szilíciumból készült napelemek elvi felépítése az 12.7.3/1 ábrán látható.

A napelemet ért sugárzás különböző energiájú fotonjai abszorpciójának valószínűsége a félvezető anyag belsejébe előre haladva változik. Minél nagyobb a fotonok energiája, annál nagyobb a valószínűsége, hogy a felület közelébe hozzon létre töltéshordozó lyuk-elektron párt és fordítva. Minél kisebb a fotonok energiája annál mélyebbre kell az anyagban előrehaladniuk, hogy töltéshordozó lyuk-elektron párt generáljanak.



12.7.3/1 ábra. Az egykristályos, ill polikristályos szilícium anyagú napelem elvi felépítése

A napelem villamos karakterisztikájának meghatározásához az 12.7.3/2. ábrán látható koncentrált paraméterű villamos helyettesítő képet használhatjuk.



$$U_D = U + I \cdot R_s \text{ és } I = I_F - I_D - U_D/R_p$$

12.7.3/2. ábra. A napelem villamos helyettesítő képe

$I_F$  a fotonok által generált áram,  $R_p$  a párhuzamos veszteségi ellenállás koncentrált értéke (a napelem felületén keletkező veszteségek összege),  $R_s$  a soros veszteségi ellenállás koncentrált értéke (a napelem kontaktusain és belső áramvezetésében keletkező veszteségek összege),  $I_D$  a pn átmeneten  $U_D$  feszültség hatására átfolyó (megvilágítás mentes esetre vonatkoztatott, azaz sötét) áram koncentrált értéke, és végül  $U$  az  $R_t$  külső terhelőellenálláson átfolyó  $I$  külső áram hatására keletkezett feszültség.

A helyettesítő kép diódaáramára jó közelítéssel szolgál a következő egyenlet

$$I_D = I_0 [\exp(U_D / U_T) - 1] + I_r [\exp(U_D / 2U_T) - 1], \quad (12.7.3/1)$$

ahol  $I_0$  és  $I_r$  telítési áramösszetevők és  $U_T$  az un. termikus feszültség, amelyekre a következő összefüggések érvényesek:

$$I_0 \approx A \frac{q D n_i^2}{N L} \tanh(d / L), \quad (12.7.3/2)$$

ahol  $A$  a napelem felülete,  $D$  és  $L$  a kisebbségi töltéshordozók (jelen esetben az elektronok) diffúziós állandója és diffúziós hossza a bázis rétegben (jelen esetben a p típusú rétegben),  $d$  a bázisréteg vastagsága,  $N$  a bázisréteg szennyezési koncentrációja,  $q$  az elektron töltése ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  Coulomb),  $n_i$  a félvezető anyag intrinsic (szennyezés mentes) koncentrációja amit egyébként különböző hőmérsékleten az alábbiak szerint határozhatunk meg:

$$n_i = 3,9 \cdot 10^{16} T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{g0}}{2kT}\right), \quad (12.7.3/3)$$

ahol  $T$  a félvezető anyag hőmérsékletének abszolút értéke,  $k$  a Boltzmann állandó ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/°K ;  $8,61 \cdot 10^{-5}$  eV/°K ; ) és  $E_{g0}$  a félvezető a anyag tiltottsáv-szélessége 0 °K-en (szilíciumnál  $E_{g0} = 1,21$  eV ;).

A diffúziós állandó és a diffúziós hossz között a kisebbségi töltéshordozó élettartama  $L = \sqrt{D\tau}$  összefüggés teremt kapcsolatot, így a 12.7.3/2 összefüggésre

$$\text{ha } L \gg d, \text{ akkor } I_0 \cong A \frac{qn_i^2 d}{N\tau}, \text{ és ha } L < d \text{ akkor pedig } I_0 \cong A \frac{qn_i^2}{N} \sqrt{\frac{D}{\tau}} \quad (12.7.3/4)$$

adódik.  $I_r$  értéke az

$$I_r = A \frac{qn_i W}{2\tau} \quad (12.7.3/5)$$

összefüggésből számolható ki, ahol  $W$  a tértöltés tartomány szélessége.

Az  $U_T$  termikus feszültségre a  $kT/q$  összefüggés érvényes. ( $T=300$  °K-en  $U_T=26$  mV)

A fotonok által generált  $I_F$  fotoáram az

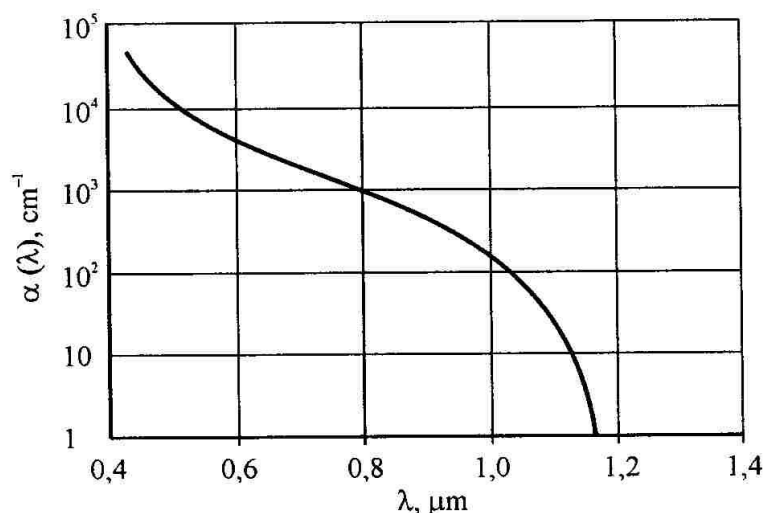
$$I_F = qA \int_0^{hc/E_g} \phi(\lambda) [1 - R(\lambda)] Q(\lambda) [1 - \exp(-\alpha(\lambda)l)] d\lambda \quad (12.7.3/6)$$

egyenlet alapján határozható meg, ahol  $R(\lambda)$  a napelem felületének reflexiós tényezője,  $\alpha(\lambda)$  a félvezető anyag abszorpciós tényezője,  $l$  a napelem vastagsága és  $Q(\lambda)$  a kollektív hatásfok, amely azt fejezi ki, hogy a generált töltéshordozók hányad része jut el az áramvezető kontaktusokhoz. A 12.7.3/3 ábrán látható az egykristályos szilícium  $\alpha$  abszorpciós tényezőjének változása a  $\lambda$  hullámhossz függvényében.

A 12.7.3/6 egyenletből következik, hogy az  $A$  aktív felületű napelemben annál nagyobb  $I_F$  fotoáram generálódik, minél kisebb az  $R$  reflexiós tényező, minél nagyobb a  $Q$  kollektív hatásfok és az  $\alpha$  abszorpciós tényező. A napelem felületét úgy kell kialakítani, hogy a hasznos hullámhossz tartományban az  $R$  reflexió minél kisebb legyen. Ez különböző vékonyréteg optikai bevonatokkal, többszörös felületi reflexióval (texturálás) a gyakorlatban igen jól biztosítható és a reflexiót 10% alatt lehet tartani. A közel teljes abszorpciót pedig megfelelő anyagvastagsággal lehet biztosítani és elérhető, hogy a hasznos hullámhossz tartományban  $[1 - \exp(-\alpha(\lambda)l)] \approx 1$ .

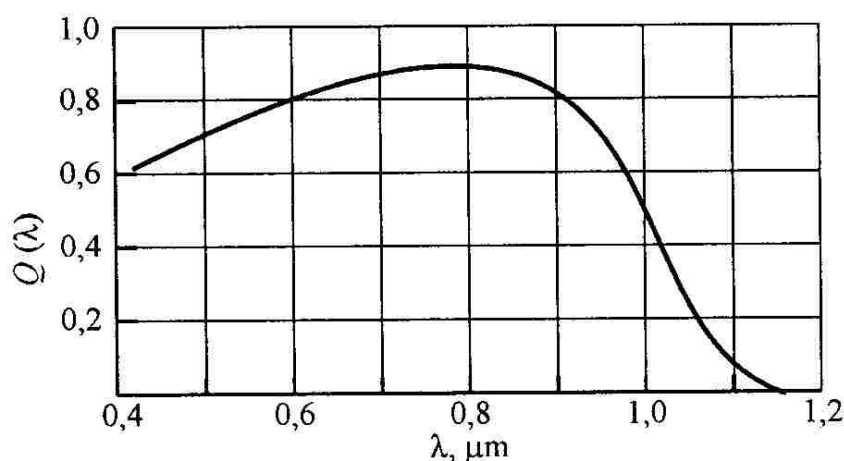
A kollektív hatásfok értéke a konstrukciótól, technológiától, anyagválasztástól jelentős mértékben függ, a fizikai jellemzőket illetően a kisebb méretű töltéshordozók élettartama, mozgékonyasága, felületi rekombinációs sebessége, a konstrukciótól pedig a töltésválasztó réteg mélysége és a napelem vastagsága befolyásolja a kollektív hatásfok értékét.





12.7.3/3. ábra. Egykristályos szilícium  $\alpha$  abszorpciós tényezőjének változása a hullámhossz függvényében

A 12.7.3/4. ábra az egykristályos szilíciumból készült napelem  $Q$  kollektív hatásfok változását ábrázolja a  $\lambda$  hullámhossz függvényében.



12.7.3/4. ábra. A  $Q$  kollektív hatásfok hullámhossz függése egykristályos szilícium napelemnél

Az 12.7.3/4. ábrán látható, hogy  $Q(\lambda)$  értéke széles - a Nap sugárzási spektrumának jelentős energia tartalmú - hullámhossz tartományban nem változik lényegesen. Ezek alapján a napelemek többségénél a 12.7.3/6 egyenlet az alábbiakra egyszerűsödik:

$$I_F = qA\phi_g Q \cdot (1 - R) \quad (12.7.3/7)$$

Vagyis a fotoáram az  $E_g$  -nél nagyobb energiájú fotonfluxussal egyenesen arányos!

A 12.7.3/2. ábrából adódik, hogy

$$I = I_F - I_D - \frac{U + IR_s}{R_p} = \frac{1}{1 + R_s/R_p} (I_F - I_D) - \frac{U}{R_s + R_p} \quad (12.7.3/8)$$

A napelemnél  $R_s \ll R_p$ . Ezt figyelembe véve a 12.7.3/8 egyenletbe a 12.7.3/1 egyenletet, és az  $U_D = U + IR_s$  összefüggést behelyettesítve kapjuk a napelem kimenő karakterisztikáját leíró alábbi egyenletet.

$$I = I_F - I_0 \left[ \exp \frac{U + IR_s}{U_T} - 1 \right] - I_r \left[ \exp \frac{U + IR_s}{2U_T} - 1 \right] - \frac{U}{R_p} \quad (12.7.3/9)$$

Látható, hogy  $I$  explicit módon nem fejezhető ki.

Az eddigiekből látható az is továbbá, hogy a karakterisztikák hőmérsékletfüggöek.

Vizsgáljuk meg a karakterisztika két szélső értékét a rövidzárás és az üresjárás esetét.

Rövidzárás esetén  $U = 0$  és  $I = I_z$ . Így a 12.7.3/9 egyenlet az 12.7.3/7 egyenlet felhasználásával a következőképpen alakul:

$$I = I_z \cong I_F = qA\phi_g Q \cdot (1 - R) \quad (12.7.3/10)$$

Tehát az  $I_z$  rövidzárási áram jó közelítéssel megegyezik az  $I_F$  fotóárammal, amely a  $\phi_g$  fotonfluxussal, megvilágítással egyenesen arányos.

Üresjárás esetén  $I = 0$  és  $U = U_0$ . Még alacsony fotonfluxusnál is a napelemnél  $I_F \gg U_0/R_p$  és  $U_0 \gg U_T$ . A 12.7.3/9 egyenletből a 12.7.3/7 és a 12.7.3/4 egyenlet felhasználásával az alábbi adódik:

$$\text{ha } L \gg d, \text{ akkor } U_0 \cong U_T \ln \frac{I_F}{I_0} \cong U_T \ln \phi_g \frac{N\tau Q}{n_i^2 d} (1 - R), \text{ és}$$

$$\text{ha } L < d \text{ akkor pedig } U_0 \cong U_T \ln \phi_g \frac{NQ}{n_i^2} \sqrt{\frac{\tau}{D}} (1 - R) \quad (12.7.3/11)$$

Tehát az  $U_0$  üresjárási feszültség jó közelítéssel a  $\phi_g$  fotonfluxus, megvilágítás logaritmusával egyenesen arányos.

Ha elvégezzük a 12.7.3/8 egyenlet differenciálását a rövidzárás és üresjárás esetére, akkor a következő összefüggéseket kapjuk:

$$\left. \frac{dI}{dU} \right|_{\substack{U=0 \\ I=I_z}} \approx -\frac{1}{R_p} \quad (12.7.3/12)$$

$$\left. \frac{dI}{dU} \right|_{\substack{U=U_0 \\ I=0}} \approx -\frac{1}{R_s} \quad (12.7.3/13)$$

Vagyis a karakterisztikák meredekségét a rövidzárási ill. üresjárási pontokban a soros ill. párhuzamos veszteségi ellenállások határozzák meg!

Ideális esetben a soros veszteségi ellenállás  $R_s = 0$ , és a párhuzamos veszteségi ellenállás  $R_p = \infty$ . A kvázi ideális napelem ( $R_s = 0$ ,  $R_p = \infty$ , de a helyettesítő képen valóságos dióda karakterisztikát feltételezve) karakterisztikájára az 12.7.3/9 egyenletből ezen értékek figyelembevételével a következő egyenlet adódik:

$$I = I_F - I_0 \left[ \exp \frac{U}{U_T} - 1 \right] - I_r \left[ \exp \frac{U}{2U_T} - 1 \right] \quad (12.7.3/14)$$

A napelemből kivehető P teljesítmény az U feszültség és az I áram szorzata. A legnagyobb kivehető teljesítményt azon a karakterisztika ponton kapjuk, ahol  $\frac{dP}{dU} = 0$ .

Ha a legnagyobb kivehető teljesítmény kiszámításához a 12.7.3/14 egyenlet első két tagját vesszük figyelembe - ami egyébként jó közelítésül szolgál -, akkor az alábbi adódik:

$$P = U \cdot I \approx U \left\{ I_F - I_0 \left[ \exp \frac{U}{U_T} - 1 \right] \right\} \quad (12.7.3/15)$$

Keressük meg P szélső értékét. Ha P-t U szerint differenciáljuk, akkor az alábbi adódik:

$$\frac{dP}{dU} = 0 = I_F - I_0 \exp \frac{U}{U_T} - \frac{U}{U_T} I_0 \exp \frac{U}{U_T} \quad (12.7.3/16)$$

A maximális teljesítményhez  $P_m$ -hez tartozó  $U_m$  munkaponti feszültség, ill.  $I_m$  munkaponti áram tartozik. A 12.7.3/15 és az 12.7.3/16 egyenlet felhasználásával az alábbi összefüggés adódik:

$$P_m = U_m I_m \frac{1}{1 + \frac{U_m}{U_T}} \quad (12.7.3/17)$$

Miután a gyakorlati esetekben  $\frac{U_m}{U_T} \gg 1$  a 12.7.3/15 egyenlet a maximális teljesítményű pontban a következőképpen alakul:

$$P_m = U_m \cdot I_m \approx U_m \left( I_F - I_0 \exp \frac{U_m}{U_T} \right) \quad (12.7.3/18)$$

Ezt a 12.7.3/17 egyenlettel összevetve a  $\frac{U_m}{U_T} \approx \ln \frac{I_F}{I_0} - \ln \left( \frac{U_m}{U_T} + 1 \right)$  adódik.

Jó közelítés kapunk  $U_m$ -re, ha ennek az egyenletnek a jobb oldalán lévő második tagba a 12.7.3/11 egyenletből  $U_0 \cong U_T \ln \frac{I_F}{I_0}$  kifejezést felhasználva és figyelembe véve, hogy

$U_m \approx U_0$  és  $\frac{U_m}{U_T} \gg 1$  helyettesítünk. Ekkor

$$U_m = U_T \left( \ln \frac{I_F}{I_0} - \ln \ln \frac{I_F}{I_0} \right) \quad (12.7.3/19)$$

$I_m$ -re pedig hasonló gondolatmenet alapján a következő kifejezés adódik:

$$I_m = I_F \left( 1 - \frac{1}{\ln \frac{I_F}{I_0}} \right) \quad (12.7.3/20)$$

A kvázi ideális napelem  $P_m$  maximális teljesítményére pedig a 12.7.3/18, 12.7.3/19 és 12.7.3/20 egyenletek felhasználásával az alábbi összefüggést kapjuk:

$$P_m = U_T I_F \frac{\left( \ln \frac{I_F}{I_0} - \ln \ln \frac{I_F}{I_0} \right) \left( \ln \frac{I_F}{I_0} - 1 \right)}{\ln \frac{I_F}{I_0}} \quad (12.7.3/21)$$

$\frac{I_F}{I_0}$  értéke a 12.7.3/4 és a 12.7.3/7 egyenletből a következőkre adódik:

$$\text{ha } L \gg d, \text{ akkor } \frac{I_F}{I_0} = \phi_g \frac{N\tau Q}{n_i^2 d} (1-R), \text{ és}$$

$$\text{ha } L < d \text{ akkor pedig } \frac{I_F}{I_0} = \phi_g \frac{NQ}{n_i^2} \sqrt{\frac{\tau}{D}} (1-R) \quad (12.7.3/22)$$

Ha a napelem hatásfokát meg akarjuk határozni, akkor a teljes beérkező  $P_{be}$  sugárzási teljesítményt kell figyelembe venni, azaz a teljes spektrumban a teljes napelem felületre időegység alatt beérkező energiával kell számolnunk.

$$P_{be} = AE = A\phi E_{av} \quad (12.7.3/23)$$

Az  $\eta$  napelem hatásfok a  $P_m$  maximális teljesítmény és a teljes beérkező  $P_{be}$  sugárzási teljesítmény hányadosa.

$$\eta = \frac{P_m}{P_{be}} \quad (12.7.3/24)$$

A kvázi ideális napelem esetére az  $\eta$  napelem hatásfokra a következő kifejezés adódik:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{be}} = \frac{kT\phi_g}{\phi E_{av}} Q(1-R) \frac{\left( \ln \frac{I_F}{I_0} - \ln \ln \frac{I_F}{I_0} \right) \left( \ln \frac{I_F}{I_0} - 1 \right)}{\ln \frac{I_F}{I_0}} \quad (12.7.3/25)$$

Napelemek minőségét az un. FF kitöltési tényezővel (fill faktor) is jellemezni szokták.

Az FF kitöltési tényező a  $P_m$  maximálisan kivehető teljesítmény valamint az  $U_0$  üresjárási feszültség és az  $I_z$  rövidrezárási áram szorzatának hányadosa.

$$FF = \frac{P_m}{U_0 I_z} \quad (12.7.3/26)$$

Ideális napelem esetén a FF kitöltési tényező 1 volna ( $R_s = 0$ ,  $R_p = \infty$  és ideális dióda karakterisztikát feltételezve). Kvázi ideális esetre a 12.7.3/10, 12.7.3/11 és a 12.7.3/20 egyenletek felhasználásával a FF kitöltési tényezőre a következő összefüggést kapjuk:

$$FF = \frac{P_m}{U_0 I_z} = \left( 1 - \frac{\ln \ln \frac{I_F}{I_0}}{\ln \frac{I_F}{I_0}} \right) \left( 1 - \frac{1}{\ln \frac{I_F}{I_0}} \right) \quad (12.7.3/27)$$

### Egy konkrét napelem jellemzői

Nézzük meg a fentiek felhasználásával, hogy egy konkrét egykristályos szilícium napelem jellemzői, karakterisztikái hogyan alakulnak különböző sugárzási feltételek mellett. Az ismertetésre kerülő napelem jellemzők a szerző vezetésével kifejlesztett és gyártásba vitt SC3 típusu napelemek adatai.

A példaként vett napelemek kör alakúak, és átmérőjük 76 mm (3"). Alapanyaga p típusú szilícium egykristály. Méretéből adódóan a felülete  $A = 45 \text{ cm}^2$ , amelyből a megvilágítás oldali kontaktusok kb. 12 %-ot letakarnak, azaz a megvilágítás szempontjából hasznos felület  $40 \text{ cm}^2$ . A szilícium lemez vastagsága  $l = 400 \mu$  ( $4 \cdot 10^{-2} \text{ cm}$ ).

A p típusú szilícium egykristály szennyezési koncentrációja  $N_p = 5 \cdot 10^{15} / \text{cm}^3$  (fajlagos ellenállása  $3 \Omega \text{ cm}$ , diffúziós állandója  $300 \text{ }^\circ\text{K}$ -en  $D = 12 \text{ cm}^2 / \text{sec}$ , tiltottsáv szélessége  $E_g = 1,12 \text{ eV}$ , intrinsic koncentrációjának négyzete  $n_i^2 = 2,25 \cdot 10^{20} / \text{cm}^6$ , relatív dielektromos állandója  $\epsilon = 12$ , a vákum dielektromos állandója  $\epsilon_0 = 8,855 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$ ; . A megvilágítás oldali n típusú réteg felületi koncentrációja  $N_n = 10^{19} / \text{cm}^3$ . A kisebbségi töltéshordozók a p típusú bázisrétegben az elektronok és élettartamuk  $\tau = 15 \mu\text{s}$ .

Az átlag kollektív hatásfok  $Q = 0,7$ , a reflexiós tényező pedig  $R = 0,1$ . A soros veszteségi ellenállás  $R_s = 25 \text{ m}\Omega$ , és a párhuzamos veszteségi ellenállás  $R_p = 300 \Omega$ .

A számításokat  $T = 300 \text{ }^\circ\text{K}$ -re ( $27 \text{ }^\circ\text{C}$ ) végezzük. Az  $L$  diffúziós hosszát az ismertetett  $L = \sqrt{D\tau}$  összefüggés alapján határozzuk meg.

$$L = \sqrt{12 \cdot 15 \cdot 10^{-6}} = 0,013 \text{ cm} (130 \mu)$$

Határozzuk meg  $I_0$  telítési áramösszetevő értékét a 12.7.3/6 egyenletből.

Mivel  $l = 400 \mu \cong d > L = 130 \mu$

$$I_0 \cong A \frac{qn_i^2}{N} \sqrt{\frac{D}{\tau}} = 45 \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,25 \cdot 10^{20}}{5 \cdot 10^{15}} \cdot \sqrt{\frac{12}{15 \cdot 10^{-6}}} = 290 \cdot 10^{-19} \text{ A} (290 \text{ pA})$$

$I_r$  telítési áramösszetevő kiszámításához először meg kell határozni  $W$  tértöltési tartomány szélességet, amelyhez az  $U_{d0}$  diffúziós potenciál érték ismerete szükséges.

$$U_{d0} = U_T \ln \frac{N_p N_n}{n_i^2} = 26 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{5 \cdot 10^{15} \cdot 10^{19}}{2,25 \cdot 10^{20}} = 0,859 \text{ V} (859 \text{ mV})$$

$$W \approx \left( \frac{2\epsilon\epsilon_0}{q} \cdot \frac{N_n + N_p}{N_n N_p} \cdot U_{d0} \right)^{1/2} = \left( \frac{2 \cdot 12 \cdot 8,855 \cdot 10^{-12}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \frac{10^{19} + 5 \cdot 10^{15}}{10^{19} \cdot 5 \cdot 10^{15}} \cdot 0,859 \right)^{1/2} = 4,78 \cdot 10^{-5} \text{ cm} (0,478 \mu)$$

$I_r$  telítési áramösszetevőt a 12.7.3/5 egyenletből kapjuk.

$$I_r = A \frac{qn_i W}{2\tau} = 45 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5 \cdot 10^{10} \cdot 4,78 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 15 \cdot 10^{-6}} = 172 \cdot 10^{-9} \text{ A} (172 \text{ nA})$$

$l = 400 \mu$  vastag szilícium lemezben a beérkező hatékony fotonok - amelyek energiája nagyobb a szilícium  $E_g = 1,12 \text{ eV}$  tiltottsáv szélességénél - energia tartományában a 12.7.3/3. ábra figyelembevételével az  $[1 - \exp(-\alpha(\lambda)l)] \approx 1$ . Így a 12.7.3/10 egyenletből meghatározhatjuk az  $I_F$  fotoáramot.

$$I = I_z \cong I_F = qA\phi_g Q \cdot (1 - R) = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 40 \cdot \phi_g \cdot 0,7 \cdot (1 - 0,1) = \phi_g \cdot 4,03 \cdot 10^{-18} \text{ A}$$

Az  $U_0$  üresjárású feszültséget a 12.7.3/11 egyenletből meghatározhatjuk  $L < d \cong l$  esetre, miután  $0,013 \text{ cm} < 0,04 \text{ cm}$ .

$$U_0 \cong U_T \ln \phi_g \frac{NQ}{n_i^2} \sqrt{\frac{\tau}{D}} (1-R) = 26 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \phi_g \frac{5 \cdot 10^{15} \cdot 0,7}{2,25 \cdot 10^{20}} \cdot \sqrt{\frac{15 \cdot 10^{-6}}{12}} = 26 \cdot 10^{-3} \ln \phi_g - 0,467 \text{ V}$$

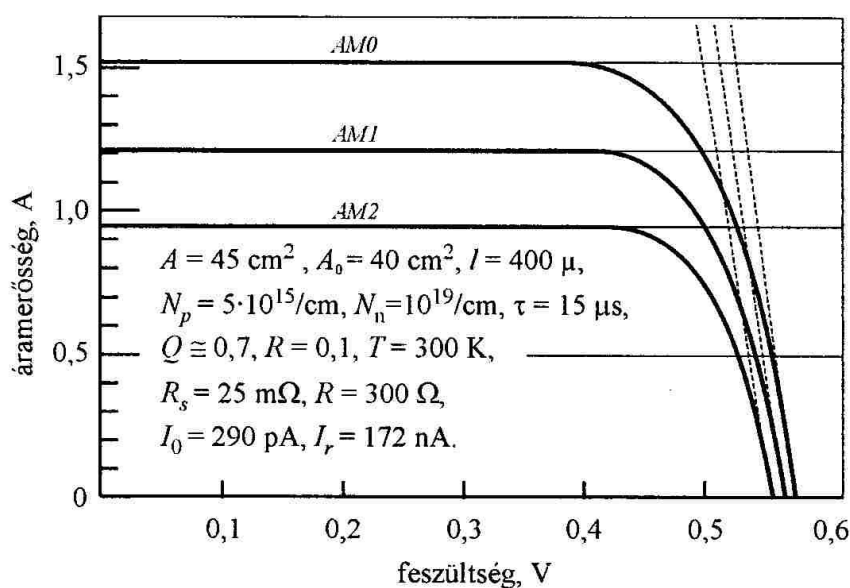
A napelem karakterisztikáját leíró 12.7.3/9 egyenlet

$$I = I_F - I_0 \left[ \exp \frac{U + IR_s}{U_T} - 1 \right] - I_r \left[ \exp \frac{U + IR_s}{2U_T} - 1 \right] - \frac{U}{R_p}$$

$T=300 \text{ °K}$ -en az alábbi szerint alakul:

$$I = \phi_g \cdot 4,03 \cdot 10^{-18} - 290 \cdot 10^{-12} \left( \exp \frac{U + 1,25 \cdot 10^{-3}}{26 \cdot 10^{-3}} - 1 \right) - 172 \cdot 10^{-9} \left( \exp \frac{U + 1,25 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 26 \cdot 10^{-3}} - 1 \right) - \frac{U}{300}$$

Ezen összefüggés alapján a 12.7.3/5 ábrán különböző AM optikai légréteg figyelembevételével megvilágításnál ábrázoltuk a példaként vett SC3 napelem számított karakterisztikáit.



12.7.3/5 ábra A példaként vett SC3 napelem számított karakterisztikái különböző AM optikai légréteggel értelmezett megvilágítás mellett

A 12.7.3/1 táblázatban összefoglaltuk egyrészt a 12.7.2/2. ábra alapján különböző AM optikai légrétegek mellett  $\phi_g$  értékeit  $E_g = 1,12 \text{ eV}$  figyelembevételével másrészt az ehhez tartozó  $I_z \cong I_F$  és  $U_0$  értékeket a példaként vett SC3 típusú napelemre.

Az 12.7.3/2 táblázatban feltüntettük a különböző AM optikai légrétegek melletti megvilágítás esetén a sugárzás fajlagos  $E$  teljesítményét, valamint a példaként vett SC3 napelem felületére érkező  $P_{be}$  sugárzási teljesítményeket, valamint a 12.7.3/5. ábra grafikus kiértékelése alapján a legnagyobb kivehető  $P_m$  teljesítményt, ehhez tartozó  $U_m$  munkaponti feszültséget és  $I_m$  áramot,  $\eta$  hatásfokot és FF kitöltési tényezőt.

A 12.7.3/19, 12.7.3/20, 12.7.3/21, 12.7.3/23, 12.7.3/25 és 12.7.3/27 egyenletek felhasználásával különböző AM értékekre megvizsgáltuk a kvázi ideális napelem jellemzőit ( $R_s = 0$ ,  $R_p = \infty$ ,  $Q = 1$ ,  $R = 0$ ) és a 12.7.3/3 táblázatban foglaltuk össze.

12.7.3/1 táblázat

	$\phi_g$ [1/s.cm <sup>2</sup> ]	$I_z \cong I_F$ [A]	$U_0$ [V]
AM0	<b>3,8.10<sup>17</sup></b>	<b>1,53</b>	<b>0,585</b>
AM1	<b>3.10<sup>17</sup></b>	<b>1,21</b>	<b>0,580</b>
AM2	<b>2,4.10<sup>17</sup></b>	<b>0,97</b>	<b>0,574</b>

12.7.3/2 táblázat

	$E=\phi.E_{av}$ [W/cm <sup>2</sup> ]	$P_{be}=EA$ [W]	$U_m$ [V]	$I_m$ [A]	$P_m$ [W]	$\eta$ [%]	FF
AM0	<b>0,135</b>	<b>6,075</b>	<b>0,48</b>	<b>1,42</b>	<b>0,681</b>	<b>11,2</b>	<b>0,76</b>
AM1	<b>0,106</b>	<b>4,77</b>	<b>0,475</b>	<b>1,13</b>	<b>0,536</b>	<b>11,2</b>	<b>0,76</b>
AM2	<b>0,088</b>	<b>3,96</b>	<b>0,472</b>	<b>0,9</b>	<b>0,425</b>	<b>10,7</b>	<b>0,76</b>

12.7.3/3 táblázat

	$I_z \cong I_F$ [A]	$U_0$ [V]	$U_m$ [V]	$I_m$ [A]	$P_m$ [W]	$\eta$ [%]	FF
AM0	<b>2,736</b>	<b>0,597</b>	<b>0,515</b>	<b>2,62</b>	<b>1,35</b>	<b>22,18</b>	<b>0,826</b>
AM1	<b>2,16</b>	<b>0,592</b>	<b>0,510</b>	<b>2,07</b>	<b>1,05</b>	<b>22,07</b>	<b>0,825</b>
AM2	<b>1,73</b>	<b>0,585</b>	<b>0,504</b>	<b>1,65</b>	<b>0,833</b>	<b>21,05</b>	<b>0,823</b>

## IRODALOMJEGYZÉK

1. Becquerel, E. : On Electric Effects Under the Influence of Solar Radiation. Compt. Rend. Vol. 9, 1839.
2. Chapin, D. M., Fuller, C.S. and Pearson, G.L.: A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electric Power. Journal of Applied Physics. Vol. 25. May 1954.
3. Rau, H. : Heliotechnik, Udo Pfriemer Verlag, München, 1976.
4. Backus, C.E. : Solar cells, IEEE Press, New York, 1976.
5. Löff G. O. G., Duffie J. A. and Clayton O. S. World Distribution of Solar Radiation, Solar Energy Laboratory of the University of Wisconsin, July 1966.
6. Major Gy. , V. Morvay A., F. Takács O. , Tárkányi Zs. és Weingartner F. A napsugárzás Magyarországon 1958-1972. OMSZ. Hivatalos kiadványa Magyarország éghajlata 10. Budapest 1976.
7. Takács O., Major Gy. , Nagy Z. és R. Paál A. A napenergia hasznosítás meteorológiai megalapozása Magyarországon. ÉTI kiadvány. Budapest 1985.
8. Messel, H. and Butler, S.T. : Solar Energy , Pergamon Press, Sydney, 1977.
9. Thekaekara, M.P. : Data on Incident Solar Radiation, Supplement to Proc. 20<sup>th</sup> Annual Meeting of Inst. For Environmental Science. 1974.
10. Kohlrausch, F. : Praktische Physik, B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1962.
11. Wolf, H.F. : Silicon Semiconductor Data, Pergamon Press, 1969.
12. Seiler, K. : Physik und Technik der Halbleiter, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft M.B.H. , Stuttgart, 1964.
13. Mbewe, D.J., Card, H.C. and Card, D.C. : A Modell of Silicon Solar Cells for Concentrator Photovoltaic and Photovoltaic/Thermal System Design. Solar Energy, Pergamon Press 35 No.3. 1985. P. 247-258.
14. Pálfy M. Napelemek villamos jellemzői, Elektrotechnika 79.évf. 1986. 10.sz. p.381-387.
15. Pálfy M. A VKI-ban folyó napelemfejlesztéssel kapcsolatosan elhangzott előadások, publikációk jegyzéke 1974-1986 között, Elektrotechnika 79.évf. 1986. 10.sz. p.387-389.
16. M.Pálfy. Photovoltaic Application. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London. Edited by J.M.Marschall and D.Dimova-Malinovska 2002.
17. Pálfy M. Fotovillamos rendszerek. Napenergia a mezőgazdaságban. Mezőgazdasági Kiadó. Budapest. Szerk. Farkas I. 2003.